



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY**

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**KONSTRUKČNÍ NÁVRH OS FRÉZKY**

DESIGN OF AXIS OF MILLING MACHINE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Roman Hájek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jan Vetiška, Ph.D.**

**BRNO 2017**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Bc. Roman Hájek**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty  
Vedoucí práce: **Ing. Jan Vetiška, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Konstrukční návrh os frézky

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Konstrukčně zaměřená práce během které má student za úkol provést návrh nosné struktury malého obráběcího stroje.

### Cíle diplomové práce:

- rešerše malých obráběcích strojů
- koncepční návrh malé frézky
- detailní návrh osy X a Y
- výrobní výkresy vybraných částí

### Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů. 2. Praha: MM publishing, s.r.o., 2010. ISBN 978-8-254-7980-3.

NEUBEBAUER, R. Werkzeugmaschinen - Aufbau, Funktionen und Anwendung von spanenden und abtragenden Werkzeugmaschinen

TLUSTY, Jiří. Manufacturing Processes and Equipment, 2000. ISBN 0201498650

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá návrhem rámu a pracovních os stolní frézky. Teoretická část je pojata formou rešerše v oblasti konstrukce malých obráběcích strojů. Praktickou částí je poté provedení návrhu pracovních os a návrhu rámové konstrukce. Do praktické části bude také zahrnut výběr hlavních důležitých komponentů.

## **ABSTRACT**

This master thesis is dealing with the design of the frame and working axis of the desktop milling machine. The theoretical part is in the form of a research of the construction of small machine tools. Practical part concerns the idea for a design of the working axis, as well as the design of the frame construction. Practical part also contains the selection of the main and most important components.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Tuhost obráběcího stroje, návrh CNC frézky, kompaktní portálová frézka

## **KEYWORDS**

Stiffness of the machine tool, design of a CNC milling machine. compact portal milling machine



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

HÁJEK, R. *Konstrukční návrh os frézky*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2017, 66 s., Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Vetiška, Ph.D.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji tímto panu Ing. Janu Vetiškovi za cenné připomínky při vypracování diplomové práce. Také bych velice rád poděkoval své rodině za umožnění studií a oporu, kterou mi byli po celou dobu studií.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jana Vetišky, Phd., a s použitím literatury uvedené v seznamu v závěru této diplomové práce.

V Brně dne 28.5.2017

.....

Hájek Roman



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>MALÉ OBRÁBĚCÍ STROJE .....</b>	<b>17</b>
2.1	Portálové frézky .....	18
2.1.1	Portálová frézka typu spodní gantry: .....	18
2.1.2	Portálová frézka typu horní gantry: .....	18
2.1.3	Portálová frézka s pohyblivým stolem: .....	19
2.2	Stolové frézky .....	20
<b>3</b>	<b>PRŮZKUM TRHU.....</b>	<b>21</b>
3.1	Solidvision.....	21
3.1.1	Univerzální frézka SLV EDU .....	21
3.1.2	Univerzální frézka SLV 300 [3] .....	22
3.2	Inaxes .....	23
3.2.1	CNC frézka EKC-250s .....	23
3.3	AZK.....	24
3.3.1	Univerzální frézka HWT E-442 CNC TROLL.....	24
3.4	Optimum .....	25
3.4.1	Vrtačko-frézka BF 46 VARIO .....	25
3.5	Tormach .....	26
3.5.1	PCNC 770 CNC MILL .....	26
3.6	Porovnání kompaktních frézek .....	27
<b>4</b>	<b>KONSTRUKCE KOMPAKTNÍ FRÉZKY .....</b>	<b>29</b>
4.1	Volba technických parametrů frézky .....	29
4.2	Výpočet řezných sil.....	29
4.2.1	Výpočet řezných sil při frézování .....	29
4.2.2	Výpočet řezných sil při vrtání: .....	31
4.3	Volba vřetena .....	32
4.4	Řešení lineární posuvové soustavy .....	36
4.4.1	Výpočet pohonu osy X.....	37
4.4.2	Výpočet pohonu osy Y.....	40
4.4.3	Výpočet pohonu osy Z .....	44
4.4.4	Volba pohonů.....	48
4.5	Konstrukční uzly .....	50
4.5.1	Lože stroje.....	51
4.5.2	Portál .....	52
4.5.3	Saně a vřeteník .....	52
4.5.4	Ochranné kryty a bezpečnosti prvky.....	53
<b>5</b>	<b>ZHODNOCENÍ A DISKUZE .....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>57</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....</b>	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....</b>	<b>61</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>66</b>



# 1 ÚVOD

Třískové obrábění patří k nejrozšířenějším strojírenským technologiím. Postupem času jsou kladeny čím dál tím vyšší nároky na geometrickou přesnost, produktivitu stroje, tuhost stroje a jiné parametry. Technický vývoj je nezastavitelný, a tím jsou i výrobci obráběcích strojů nuceni ke zdokonalování a zefektivňování strojů. Používají se nové materiály jako polymer-beton s vysokým tlumícím účinkem nebo kompozitní materiály. Nejnovějším trendem je přímá kompenzace vzniklých deformací např. vyložením vřeteníku horizontální vyvrtávačky. Může mít přímo lehce prohnutý tvar, tak aby byl při plném vyložení ve stejné úrovni. Další možnou metodou je technologie, která se vyvíjela na ústavu výrobních strojů a zařízení RCMT. Metoda spočívá v přesném měření deformací v každém okamžiku pomocí laserových snímačů, jež poskytuje přímou zpětnou vazbu řídicímu systému.

Mezi nejrozšířenější technologie třískového obrábění patří frézování. Pomocí frézování se obrábí rovinné a tvarové plochy, vrtají otvory, případně zhotovují závity. Vzhledem ke zvyšující dostupnosti potřebných dílů pro stavbu malých frézovacích strojů, se s nimi dnes můžeme setkat i v amatérských dílnách. K řízení jednotlivých os frézky se využívají jednodušší systémy např. MACH3 nebo Linux CNC.

Zvolené téma zaměřené na návrh konstrukce frézovacího stroje pro studijní účely bylo ideální z důvodu zamýšlené vlastní realizace frézky. Při práci bude osvojen postup a metodika pro správný návrh stroje, uveden přehled možností konstrukčních řešení jednotlivých uzlů a přehled dostupných komponentů potřebných pro stavbu stroje.

Cílem technicky zaměřené části práce je konstrukční návrh malého frézovacího stroje. Vyrobená frézka by měla sloužit jako demonstrační výukové zařízení, avšak bude konstruována, aby splňovala kvalitativní požadavky pro komerční použití. Začátek práce je zaměřen na přiblížení problematiky a průzkum trhu. Druhá část je věnována samotnému návrhu konstrukce frézky. Počínaje volbou technických parametrů stroje přes výpočty a volbu vhodných komponent až po vytvoření 3D modelu včetně výkresové dokumentace. Závěrem práce je zhodnocení dosažených výsledků.



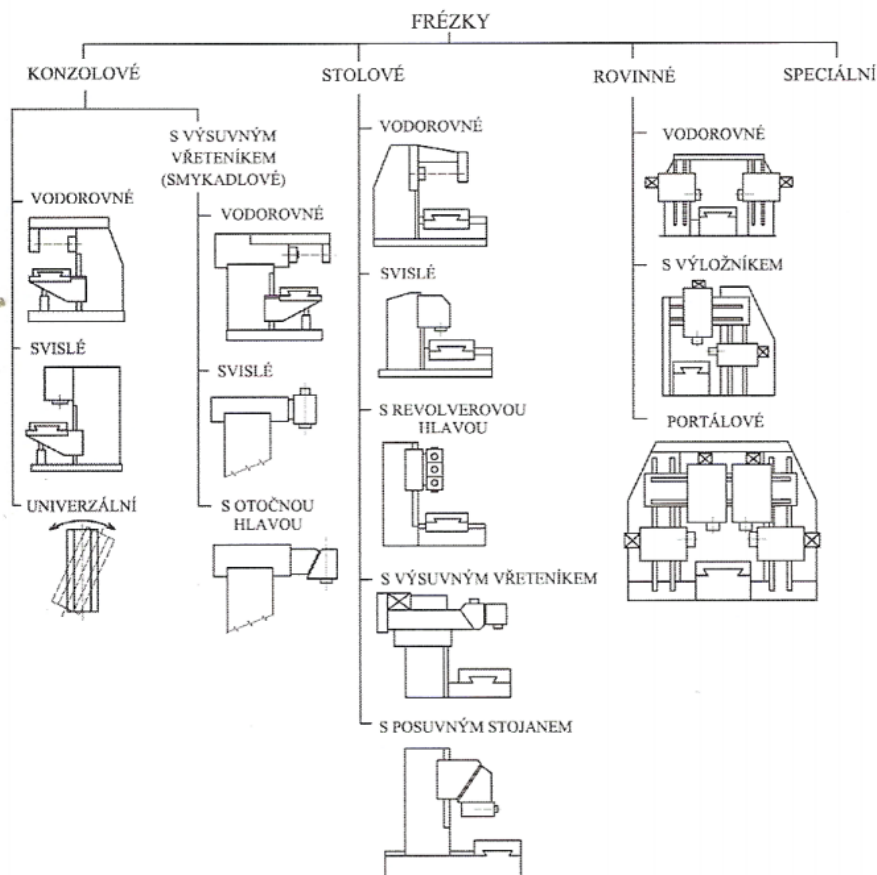


## 2 MALÉ OBRÁBĚCÍ STROJE

Obráběcí stroje jsou obecně využívány pro výrobu součástí různých druhů a velikostí, a to ubíráním materiálu ve formě třísek pomocí řezného nástroje. Hlavní řezný pohyb může vykonávat jak nástroj, tak obrobek – např. u soustružení je hlavní řezný pohyb rotační vykonáván obrobkem, na druhou stranu u frézování je obrobkem vykonáván pohyb vedlejší. Frézování může být čelní nebo obvodové, záleží na vzájemné poloze nástroje s obrobkem. Dále rozlišujeme sousledné a nesousledné frézování, a to dle orientace hlavních pohybů – u sousledného se nástroj (fréza) otáčí ve směru pohybu stolu s obrobkem, u nesousledného naopak. Tato diplomová práce se zabývá konstrukcí malého frézovacího stroje neboli frézky.

Frézovací stroje jsou nejrozšířenější obráběcí stroje, které se používají pro frézování rovných a zakřivených drážek, zubů ozubených kol, nejčastěji však pro frézování ploch rovinných. U frézování se rozlišuje dle orientace polohy frézy k obrobku na frézování obvodové a čelní. Dále se dělí na frézování sousledné (fréza se otáčí ve směru stolu s obrobkem) a nesousledné (fréza se otáčí proti směru stolu), a to v závislosti na orientaci hlavních pohybů.

Frézovací stroje mají různé konstrukční uspořádání, a to podle účelu, ke kterému budou využívány. Dělí se na stolové frézky, konzolové frézky, rovinné frézky a speciální frézky (s paralelní kinematikou). Všechny zmíněné typy mohou být řízeny ručně, číslicově nebo počítačem. Tato diplomová práce se bude zabývat konstrukcí mechanických částí počítačem řízené frézky pro obrábění. [1] [2]



Obr. 1) Rozdělení konvenčních frézovacích strojů [21]

## 2.1 Portálové frézky

### 2.1.1 Portálová frézka typu spodní gantry:

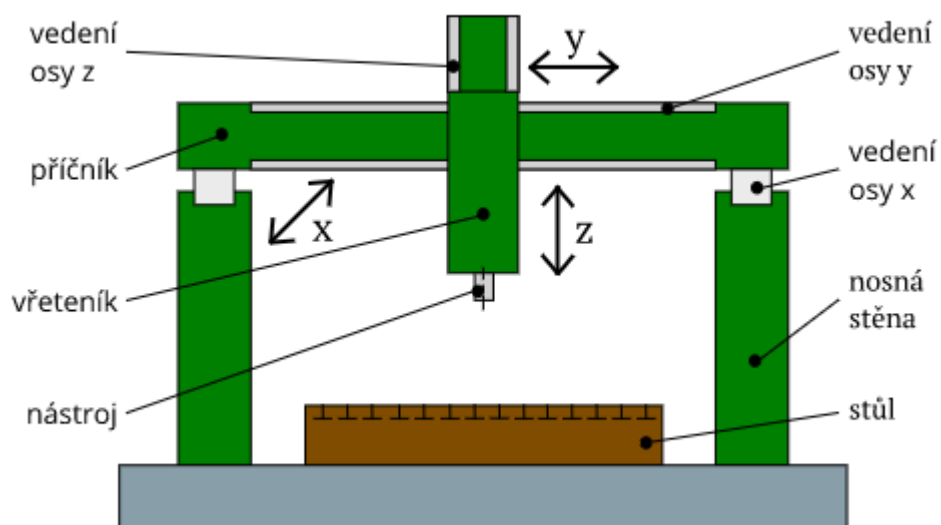
Diagram illustrating the structure of a machine tool, showing the coordinate system and components:

- vedení osy z**: Guide for the Z-axis.
- y**: Y-axis coordinate.
- vedení osy y**: Guide for the Y-axis.
- příčník**: Crossbar.
- x**: X-axis coordinate.
- vřeteník**: Spindle.
- z**: Z-axis coordinate.
- nosná stěna**: Support wall.
- stůl**: Table.
- vedení osy x**: Guide for the X-axis.
- nástroj**: Tool.

Obr. 2) Portálová frézka typu spodní gantry

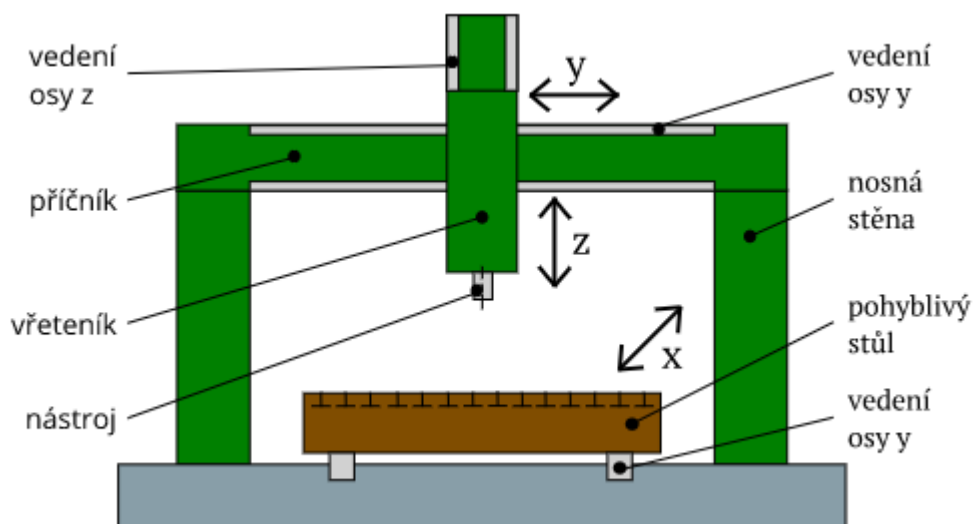
### 2.1.2 Portálová frézka typu horní gantry:

18



Obr. 3) Portálová frézka typu horní gantry

### 2.1.3 Portálová frézka s pohyblivým stolem:

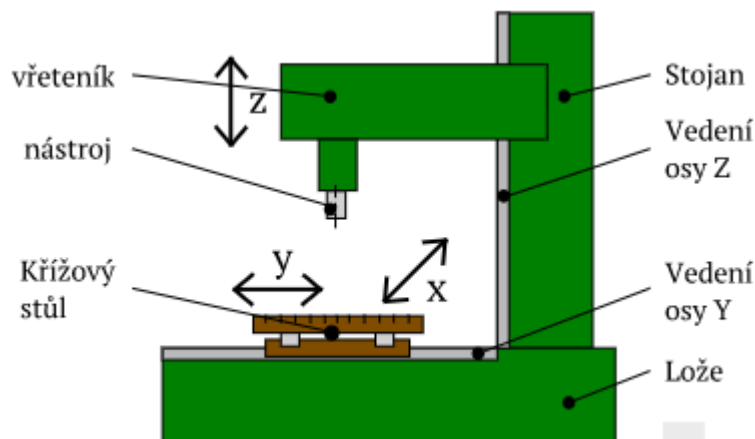


Obr. 4) Portálová frézka s pohyblivým stolem

Tato koncepce vykazuje nejvyšší tuhost z výše uvedených, a je docílena pevným portálem, po kterém se pohybuje vřeteník. Je vhodná pro obrobky nižších hmotností, a to zejména kvůli pohyblivému stolu, při jehož činnosti je potřeba hýbat celou soustavou – stůl a obrobek. Výhodou je jednoduché použití jednoho pohonu pro uvedení stolu do pohybu. [1]

## 2.2 Stolové frézky

Základním znakem stolních frézek je stojan, po kterém se pohybuje ve svislém směru vřeteník. Frézka je vybavena tzv. křížovým stolem, který umožňuje příčný i podélný pohyb obrobku. Frézky tohoto typu dosahují dostatečné tuhosti pro frézování ocelí a jsou hojně používány k vyvrtávání. Často se nachází v prototypových a zámečnických dílnách. [1]



Obr. 5) Popis stolové svislé frézky

Tab 1) Porovnání jednotlivých typů konstrukčních uspořádání

TYP	Tuhost	Počet použitých pohonů	Cena výroby
Horní gantry	Střední	4	Vysoká
Spodní gantry	Střední	4	Střední
S pohyblivým stolem	Vysoká	3	Nízká
Stolová svislá	Vysoká	3	Střední

Při volbě konstrukčního uspořádání je nutné zohlednit přínosy jednotlivých typů. Jak z hlediska celkové tuhosti, tak složitosti výroby, která je spojená s náklady na realizaci konstruovaného stroje. Z těchto hledisek je předběžným voleným typem portálová frézka s pohyblivým stolem.

## 3 PRŮZKUM TRHU

Před samotným zahájením vlastního návrhu je zapotřebí zhodnotit možná řešení, která jsou v dnešní době dostupná. V následujících odstavcích budou představeny nejvýznamnější tuzemské a zahraniční firmy specializované na vývoj malých kompaktních obráběcích strojů.

### 3.1 Solidvision

Je firma specializovaná na distribuci a podporu programu Solidworks, což je strojírenský 3D CAD software navržený pro platformu Microsoft Windows. Mimo to se však zaměřují i na jiné aspekty strojírenského odvětví, a přišli také s myšlenkou, že na trhu chybí CNC stroj malých rozměrů, který by mohl především sloužit pro studijní účely. Z toho důvodu začala společnost vyvíjet školní frézky SLV EDU. Primární zaměření jejich strojů jsou edukativní účely, modelářství a prototypové dílny. I přes své malé rozměry jsou frézky SLV velmi dynamické, rychlé a přesné, což umožňuje použití frézky i na náročnější obráběcí operace, a tím se co nejvíce blíží klasickým produkčním strojům, které známe z konvenční kovovýroby. [3]

#### 3.1.1 Univerzální frézka SLV EDU

Stroj je vhodný pro obrábění dřeva, plastů, kompozitních materiálů a slitin hliníku. Svými rozměry najde uplatnění především ve výukových odvětvích a prototypových dílnách. U stroje je možná volba vřetene, a to buď HSD s manuální výměnou nástroje pro kleštiny ER25, umožňující upnutí nástrojů až do průměru 16 mm anebo vřeteno IMT s pneumatickým uvolněním nástroje s kuželovou dutinou ISO20/ER16, která umožňují upnutí nástrojů do průměru 10 mm. Frézka je vybavena zásobníkem nástrojů ATCH-9, což vede ke zvýšení produktivity. O řízení se stará řídicí systém Arem Pro, vyvinutý společností Solidvision. Frézka je konstruována s pohyblivým portálem čímž je docíleno poměrně nízkých půdorysných rozměrů k velikosti rozměrů pracovního stolu. Všechny osy jsou osazeny kvalitními kuličkovými šrouby poháněny servopohony. Lineární vedení je použito kuličkové dodávané společností BOSH REXROTH. [3]



Obr. 6) Univerzální frézka SLV EDU [3]

Tab 2) Technické údaje stroje SLV EDU [3]

Specifikace	Hodnoty
Rozměry pracovního stolu	476 x 400 mm
Rozsah pojezdu - osa X	365 mm
Rozsah pojezdu - osa Y	400 mm
Rozsah pojezdu - osa Z	185 mm
Rychloposuv	20 000 mm/min
Výkon vřetene	2,1 kW
Max. krouticí moment vřetene	1,1 Nm
Rozsah otáček	1000-24000 min <sup>-1</sup>
Krouticí moment motoru - osa X	1,15 Nm
Krouticí moment motoru - osa Y	2,05 Nm
Krouticí moment motoru - osa Z	1,15 Nm
Kleština	ER25 DIN 6499
Opakovatelná přesnost	0,005 mm
Rozměry stroje	2000 x 770 x 940
Hmotnost stroje	300 kg
Cena bez DPH	?

### 3.1.2 Univerzální frézka SLV 300 [3]

Stroj využívá portálové konstrukce s horními gantry. Je určen pro obrábění hliníkových slitin, kompozitních materiálů, barevných kovů a grafitu. Tento malý stroj je schopný obrábět s přesností 0,01mm. Díly stroje jsou obráběny na velice přesných obráběcích centrech Hermle C20U a jsou přísně kontrolovány sondou Renishaw. Kostra je tvořena z masivního hliníku, čímž je zaručena tvarová stálost a vysoká tuhost. Pro stavbu jsou použity pouze kvalitní komponenty od předních výrobců jako např. Bosh Rexroth, TG Drives, FUJI, HSD, aj. [3]



Obr. 7) Univerzální frézka SLV 300 [3]

Tab 3) Technické údaje stroje SLV 300 [3]

Specifikace	Hodnoty
Rozměry pracovního stolu	475 x 400 mm
Rozsah pojezdu - osa X	375 mm
Rozsah pojezdu - osa Y	400 mm
Rozsah pojezdu - osa Z	200 mm
Rychloposuv	30 000 mm/min
Výkon vřetene	2,1 kW
Max. krouticí moment vřetene	1,1 Nm
Rozsah otáček	1000-24000 min <sup>-1</sup>
Krouticí moment motoru - osa X	1,9 Nm
Krouticí moment motoru - osa Y	1,9 Nm
Krouticí moment motoru - osa Z	1,9 Nm
Kleština	ER25 DIN 6499
Opakovatelná přesnost	0,005 mm
Rozměry stroje	1330 x 1270 x 2350
Hmotnost stroje	815 kg
Cena bez DPH	?

### 3.2 Inaxes

Česká společnost, která vznikla jako sesterská firma společnosti Proma pro oblast prodeje a vývoje CNC strojů. Na trh dodávají vertikální a horizontální obráběcí centra, CNC soustruhy s rovným i šikmým ložem, karusely, soustružnická centra, vertikální frézky a rovinné brusky. Ve své nabídce mají mimo jiné i dva malé obráběcí stroje spadající do modelové řady e-zone. [4]

#### 3.2.1 CNC frézka EKC-250s

Frézka je vhodná pro obrábění plastů, dřeva a lehce obrobitelných kovů. Může najít uplatnění pro školní výukové účely a pro modelářské výrobky. Je vybavena plnou CNC klávesnicí. Jedná se o koncepci stolní frézky s křížovým stolem, kde pro osy X a Y jsou použity krokové motory s krouticím momentem 4Nm. Pohyb osy Z obstarává motor s krouticím momentem 5Nm. Pro docilení maximální bezpečnosti je celý pracovní prostor zakrytován. [4]



Obr. 8) CNC frézka EKC-250s [4]

Tab 4) Technické údaje frézky EKC-250s [4]

Specifikace	Hodnoty
Rozměry pracovního stolu	450 x 460 mm
Rozsah pojezdu - osa X	250 mm
Rozsah pojezdu - osa Y	80 mm
Rozsah pojezdu - osa Z	200 mm
Rychloposuv	2000 mm/min
Výkon vřetene	1 kW
Max. krouticí moment vřetene	?
Rozsah otáček	150-2000 min <sup>-1</sup>
Krouticí moment motoru - osa X	4 Nm
Krouticí moment motoru - osa Y	4 Nm
Krouticí moment motoru - osa Z	6 Nm
Kužel vřetene	MT3
Opakovatelná přesnost	0,01 mm
Rozměry stroje	830 x 800 x 1700 mm
Hmotnost stroje	390 kg
Cena bez DPH	?

### 3.3 AZK

Majitel založil firmu v roce 1994 za účelem distribuce CAD systému CADKEY a CAD/CAM systému. Kvůli potřebám odlad'ování NC programů, se rozhodl pro vývoj vlastní CNC frézky. Od roku 1996 do současnosti prodělala jejich CNC frézka značná vylepšení, která jsou dána dlouholetými zkušenostmi. Původní CNC frézky společnosti AZK měly hliníkovou konstrukcí; v dnešní době se používají pro frézky kvalitní polymer-betonové konstrukce, dosahující vysoké tuhosti výborných tlumících vlastností. [5]

#### 3.3.1 Univerzální frézka HWT E-442 CNC TROLL

Nejnovější model firmy AZK, na jehož kostru je použit polymer-beton, pomocí něhož se vyznačuje frézka vysokou tuhostí a umožňuje i frézování oceli. Díky použití polymer-betonu vyniká nejen vysokou tuhostí, ale i vysokým tlumícím účinkem. Na přání může být vybavena výkonným vřetenem HSD 5.5 kW. [5]



Obr. 9) HWT E-442 CNC TROLL [5]



Tab 5) Technické údaje stroje HWT E-442 TROLL [5]

Specifikace	Hodnoty
Rozměry pracovního stolu	500 x 500 mm
Rozsah pojezdu - osa X	500 mm
Rozsah pojezdu - osa Y	500 mm
Rozsah pojezdu - osa Z	200 mm
Rychloposuv	10 000 mm/min
Výkon vřetene	5,5 kW
Max. krouticí moment vřetene	?
Rozsah otáček	6000 -24 000 min <sup>-1</sup>
Krouticí moment motoru - osa X	?
Krouticí moment motoru - osa Y	?
Krouticí moment motoru - osa Z	?
Kleština	?
Opakovatelná přesnost	0,005 mm
Rozměry stroje	950 x 1250 x 2330
Hmotnost stroje	1300 kg
Cena bez DPH	?

### 3.4 Optimum

Jedná se o německou firmu zabývající se vývojem a výrobou kovo-obráběcích strojů. V jejich portfoliu najdeme jak malé stolní vrtačko-frézky, velké CNC frézky, pásové pily, tak malý stolní soustruh. Vrtačko-frézky firmy Optimum a jejich malý soustruh jsou velice rozšířené na výrobních dílnách, a to zejména kvůli příznivé pořizovací ceně. [6]

#### 3.4.1 Vrtačko-frézka BF 46 VARIO

Tato vrtačko-frézka náleží mezi typické představitele malých stolních frézek. Hlavní dominantou je sloup, na kterém je výškově nastavitelné vřeteno, pro posuvy v ose x a y je použit křížový stůl. Všechny pohyby kromě hlavního rotačního pohybu jsou vyvozovány ručně. [6]



Obr. 10) Vrtačko-frézka BF 46 VARIO [6]

Tab 6) Technické údaje Vrtačko-frézky BF 46 VARIO [6]

Specifikace	Hodnoty
Rozměry pracovního stolu	850 x 240 mm
Rozsah pojezdu - osa X	500 mm
Rozsah pojezdu - osa Y	250 mm
Rozsah pojezdu - osa Z	541 mm
Rychloposuv	10 000 mm/min
Výkon vřetene	2,2 kW
Max. krouticí moment vřetene	?
Rozsah otáček	115 -3100 min <sup>-1</sup>
Krouticí moment motoru - osa X	?
Krouticí moment motoru - osa Y	?
Krouticí moment motoru - osa Z	?
Kužel vřetene	ISO40
Opakovatelná přesnost	?
Rozměry stroje	950 x 1210 x 1520
Hmotnost stroje	480 kg
Cena bez DPH	119 990 CZK

### 3.5 Tormach

Je americkou společností zabývající se především kompaktními CNC stroji. Jejich hlavní myšlenkou je poskytnout osobní CNC stroj každému kutilovi do jeho dílny. Z toho plyne jejich označení PCNC (personal computer numerical control). [7]

#### 3.5.1 PCNC 770 CNC MILL

Jedná se o kompaktní CNC frézku vhodnou převážně pro obrábění plastů, dřeva, hliníkových slitin ale disponuje také dostatečnou tuhostí pro obrábění oceli. Jeho koncepce je založena na konstrukci stolové frézky s křížovým stolem. [7]



Obr. 11) PCNC 770 CNC MILL [7]

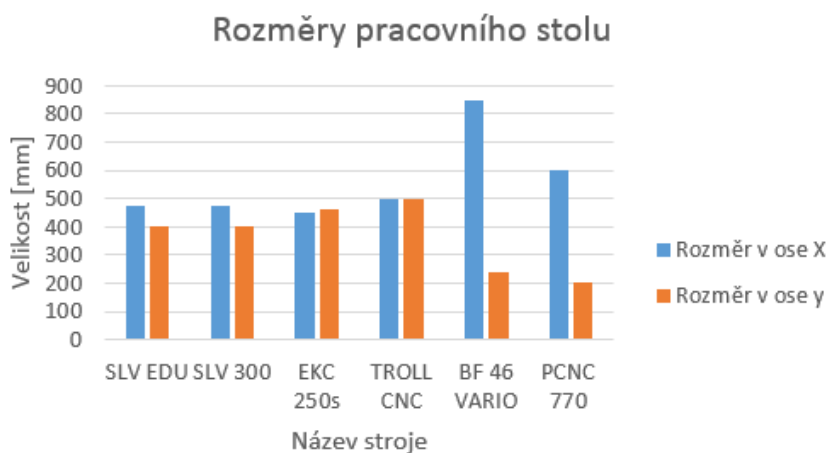
Tab 7) Technické údaje frézky PCNC 770 CNC MILL [7]

Specifikace	Hodnoty
Rozměry pracovního stolu	660 x 200 mm
Rozsah pojezdu - osa X	355 mm
Rozsah pojezdu - osa Y	190 mm
Rozsah pojezdu - osa Z	337 mm
Rychloposuv	?
Výkon vřetene	1,3 kW
Max. krouticí moment vřetene	?
Rozsah otáček	175 -10000 min <sup>-1</sup>
Krouticí moment motoru - osa X	?
Krouticí moment motoru - osa Y	?
Krouticí moment motoru - osa Z	?
Kužel vřetene	?
Opakovatelná přesnost	?
Rozměry stroje	?
Hmotnost stroje	300 kg
Cena bez DPH	180 000 CZK

### 3.6 Porovnání kompaktních frézek

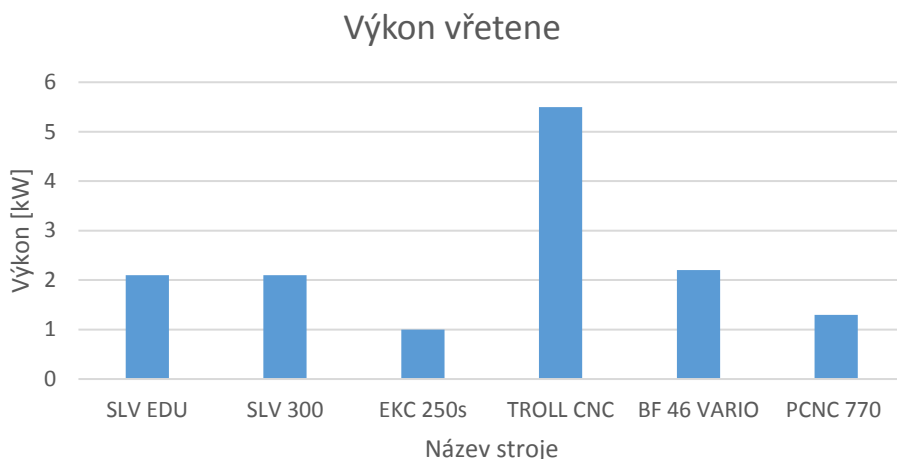
V následující kapitole jsou porovnány nejdůležitější parametry kompaktních frézek. Na základě těchto parametrů se nejčastěji uživatelé rozhodují, který stroj si vybrat pro účely, které zrovna potřebují. Mezi nejhlavnější parametry patří velikost pracovního prostoru, výkon vřetene a velikost rychloposuvu. Na základě porovnání lze rozhodnout, jakých parametrů chceme dosáhnout při konstrukci CNC kompaktní frézky.

Na grafu č. 1 je znázorněno porovnání velikosti pracovního stolu frézek. Je to rozhodující faktor pro spoustu uživatelů - každý chce mít dostatečně velký stůl pro upnutí co možná největšího obrobku, avšak nemá prostředky na nákup velké konvenční frézky. Z grafu vyplývá, že nejčastěji převyšuje rozměr v ose x nad rozměrem v ose y. Frézky stolového typu BF 46 VARIO a PCNC 770 mají značně větší stůl v ose x, avšak na úkor rozměrů v ose y. To je dáno i samotnou konstrukcí stolové frézky, u nichž převyšuje značně jeden rozměr.



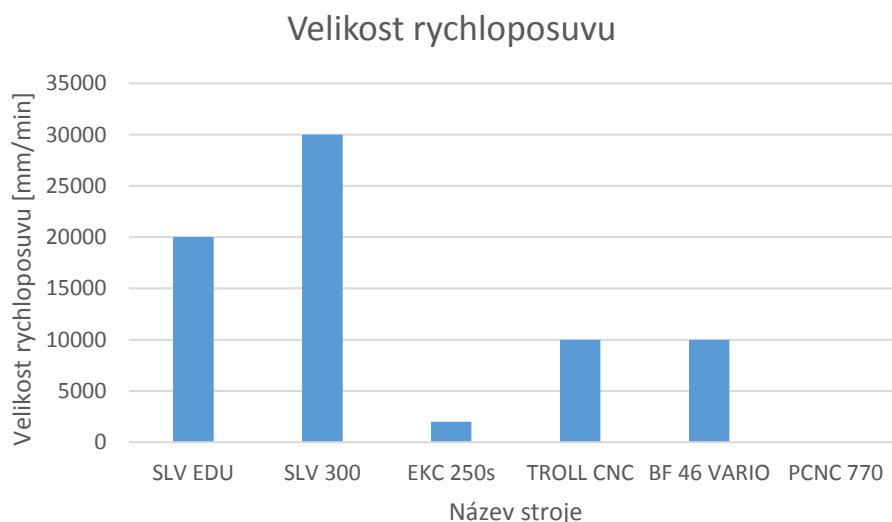
Obr. 12) Graf porovnání rozměrů pracovního stolu

Na grafu č. 2 je graficky znázorněn výkon vřeten jednotlivých kompaktních frézek. Výkon patří mezi rozhodující faktory při výběru vhodné frézky, jelikož od výkonu vřetene se odvíjí použitelnost frézky na obrábění hůře obrobitelných materiálů. Vřetena s nízkým výkonem jsou vhodná pouze pro gravírování plastů a dřeva. S vyšším výkonem jsou schopní frézovat hliník, ocel atd.



Obr. 13) Graf porovnání výkonu vřetene

Na grafu č. 3 je vynesena velikost rychloposuvů frézek, což ovlivňuje vedlejší časy při obrábění. Záleží na uživateli, zdali má stroj pro jednoúčelové použití při kusové výrobě nebo jestli je potřeba stroj pro sériovou výrobu, kde vedlejší časy hrají velkou roli.



Obr. 14) Graf porovnání velikosti rychloposuvu

Z uvedených grafů je patrné, že každý stroj má jiné konkrétní přednosti, nelze říci o jediném modelu, že by šel univerzální doporučit. U jednoho typu frézky převyšuje výkon vřetene, na druhou stranu má poměrně malý pracovní stůl; u jiných modelů je tomu naopak. Každý uživatel si tedy musí sám určit priority, co od daného stroje očekává a dle toho volit vhodný stroj.

## 4 KONSTRUKCE KOMPAKTNÍ FRÉZKY

Úkolem diplomové práce je návrh konstrukce kompaktní frézky pro školní účely. Frézka by měla být schopná obrobít dřevo, plast, ale i nelegovanou uhlíkovou ocel s obsahem uhlíku nižší než 0,25 %, na kterou bude rám frézky dimenzován. Stroj musí být dostatečně tuhý pro obrábění oceli, avšak musíme dodržet maximální šířku stroje 900 mm. Z toho vyplývá, že celkové rozměry nebudou nijak velké. Na základě rešerše bylo rozhodnuto, že se bude jednat o portálovou frézku s pohyblivým stolem. Jedná se o nejtužší řešení. Výhodou je, že pro pohyb v ose X bude použit jeden pohon na rozdíl od potřeby dvou pohonů frézky s pohyblivým portálem.

### 4.1 Volba technických parametrů frézky

Dle zadání by měla konstruovaná frézka zvládat frézování uhlíkové oceli. Pro výpočet bude použita fréza o průměru 8 mm s hloubkou záběru 5 mm. Frézka tak bude zvládat i frézování měkkých materiálů. Mimo to by měla zvládat vrtání oceli vrtákem o průměru 6 mm.

Při volbě rozměrů pracovního stolu se muselo vycházet z celkových rozměrů stroje, kde byla dáno jedno kritérium, a to o šířce 900 mm pro snadný průchod futry. Stůl o rozměrech 500x500 mm byl volen s ohledem na jeho konkurenceschopnost, a s ohledem celkových rozměrů stroje především v ose y.

Na základě rešerše o dostupných malých frézovacích strojů byly zvoleny hodnoty rychloposuvů os 5400 mm/min pro osy x a y, osa z pouze 3000 mm/min. Hodnoty nejsou vysoké, ale frézka má být primárně určená pro školní účely, a pro tento účel je to tedy dostačující. Navržené pohony budou předimenzované, a budou moci reálně dosahovat vyšších hodnot.

Tab 8) Základní parametry pro návrh stroje

Název	Hodnoty
Rychloposuv osy x a y	5400 m/min
Rychloposuv osy z	3000 m/min
Rozměry pracovního stolu	500x500 mm
Délka posuvu osy x	580 mm
Délka posuvu osy y	580 mm
Délka posuvu osy z	280 mm

### 4.2 Výpočet řezných sil

Pro návrh parametrů pohonů a pro konstrukční výpočty kuličkového šroubu je zapotřebí nejprve stanovit vznikající řezné síly, vznikající při frézování a vrtání nelegované uhlíkové oceli s obsahem uhlíku nižší než 0,25 %. Tyto výsledné síly jsou potřebné i pro celkové dimenzování stroje a pro zvolení správného vřetene s dostačujícím kroutícím momentem.

#### 4.2.1 Výpočet řezných sil při frézování

Pro výpočet řezných sil při frézování byla zvolena dvoubřitá monolitní karbidová fréza JABRO SOLID JS512 o průměru 8 mm. Maximální rozměr frézy a řezné podmínky byly zvoleny s ohledem na celkové rozměry stroje.



Obr. 15) Monolitní fréza JABRO SOLID JS512 [10]

Tab 9) Parametry pro výpočet sil při frézování [10] [11]

Název	Hodnoty
Průměr nástroje	D = 8 mm
Počet zubů	Z = 2
Posuv na zub	F <sub>z</sub> = 0.06
Řezná rychlost	v <sub>cf</sub> = 160 m/min
Hloubka záběru	a <sub>p</sub> = 5 mm
Šířka záběru	a <sub>e</sub> = 8 mm
Nástrojový ortogonální úhel čela	γ <sub>o</sub> = 12°
Nástrojový úhel nastavení ostří	κ <sub>r</sub> = 90°
Měrná řezná síla	k <sub>c1</sub> = 1500 Mpa
Nárůst měrné řezné síly	m <sub>c</sub> = 0.25

Výpočty jsou provedeny dle metodiky popsané v literaturách [12] [13]

Potřebné otáčky nástroje při frézování:

$$n_f = \frac{v_{cf} \cdot 1000}{\pi \cdot D_f} = \frac{160 \cdot 1000}{\pi \cdot 8} = 6366,2 \text{ ot/min} \quad (1)$$

Rychlost posuvu při frézování:

$$v_f = n_f \cdot Z_f \cdot f_z = 6366,2 \cdot 2 \cdot 0,06 = 763,944 \text{ mm/min} \quad (2)$$

Střední tloušťka třísky při frézování:

$$h_m = \frac{f_z \cdot \sin(\kappa_r) \cdot 180 \cdot a_e}{\pi \cdot D_{Nf} \cdot \arcsin\left(\frac{a_e}{D_f}\right)} = \frac{0,06 \cdot \sin(90) \cdot 180 \cdot 8}{\pi \cdot 8 \cdot \arcsin\left(\frac{8}{8}\right)} = 2,92 \text{ mm} \quad (3)$$

Měrná řezná síla při frézování:

$$k_{cf} = k_{cl} \cdot h_m^{-m} \cdot \left(1 - \frac{\gamma_o}{100}\right) = 1500 \cdot 2,92^{-0,25} \cdot \left(1 - \frac{12}{100}\right) = 1009,8 \text{ MPa} \quad (4)$$

Potřebný výkon vřetena při frézování

$$P_f = \frac{v_f \cdot a_p \cdot a_e \cdot k_{cf}}{6 \cdot 10^4} = \frac{763,9 \cdot 5 \cdot 8 \cdot 1009,8}{6 \cdot 10^4} = 514,29 \text{ W} \quad (5)$$

Řezná síla při frézování:

$$F_{cf} = k_{cf} \cdot a_p \cdot f_z = 1346,4 \cdot 5 \cdot 0,06 = 302,4 \text{ N} \quad (6)$$

Krouticí moment na nástroji při frézování:

$$M_{Kf} = F_{cf} \cdot \frac{D_{Nf}}{2 \cdot 10^3} = 302.4 \cdot \frac{8}{2 \cdot 10^3} = 1.21 \text{ Nm} \quad (7)$$

#### 4.2.2 Výpočet řezných sil při vrtání:

Zvolený použitelný maximální průměr vrtáku je 8 mm. Nástroj byl vybrán od výrobce SECOTOOLS s označením SD203-8.0-27-8R1. Vrták je pokryt povlakem titanu aluminem nitridem s mikro-tvrdostí 30 GPa, tím se zejména zvyšuje životnost nástroje. Výrobce doporučuje posuv na otáčku činí 0,23 mm/ot, avšak s touto hodnotou vycházely až příliš vysoké výsledné síly. Bylo za cílem výslednou sílu snížit pod hodnotu výsledné síly vznikající při frézování. Z toho důvodu se snížila hodnota posuvu na 0,08 mm/ot.

Tab 10) Parametry pro výpočet sil při vrtání [14]

Název	Hodnoty
Průměr nástroje	$D_v = 6 \text{ mm}$
Počet zubů	$z = 2$
Posuv na otáčku	$f_o = 0.06 \text{ mm/ot}$
Řezná rychlost	$v_{cv} = 120 \text{ m/min}$
Nástrojový ortogonální úhel čela	$\gamma_o = 30^\circ$
Nástrojový úhel nastavení ostří	$\kappa_r = 70^\circ$

Potřebné otáčky nástroje při vrtání:

$$n_v = \frac{v_{cv} \cdot 1000}{\pi \cdot D_v} = \frac{120 \cdot 1000}{\pi \cdot 6} = 6366.2 \text{ ot} \quad (8)$$

Posuv na zub při vrtání:

$$f_{zv} = \frac{f_o}{2} = \frac{0.06}{2} = 0.03 \text{ mm/zub} \quad (9)$$

Měrná řezná síla při vrtání:

$$k_{cv} = k_{cl} \cdot (f_{zv} \cdot \sin \kappa_r)^{-m_c} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{100}\right) = 1500 \cdot (0.03 \cdot \sin 70)^{-0.25} \cdot \left(1 - \frac{30}{100}\right) \quad (10)$$

$$k_{cv} = 2562.5 \text{ MPa}$$

Potřebný výkon vřetena při vrtání:

$$P_v = \frac{f_{zv} \cdot v_{cv} \cdot D_v \cdot k_{cv}}{240} = \frac{0.03 \cdot 100 \cdot 6 \cdot 3179.56}{240} = 192.19 \text{ W} \quad (11)$$

Krouticí moment na nástroj při vrtání:

$$M_{Kv} = \frac{P_v \cdot 30}{\pi \cdot n_v} = \frac{192.19 \cdot 30}{\pi \cdot 6366.2} = 0.29 \text{ Nm} \quad (12)$$

Rychlost posuvu při vrtání:

$$v_{fv} = f_o \cdot n_v = 0.06 \cdot 6366.2 = 381.972 \text{ mm/min} \quad (13)$$

Síla posuvu při vrtání:

$$F_f = 0.5 \cdot k_{cv} \cdot \frac{D_v}{2} \cdot f_o \cdot \sin \kappa_r = 0.5 \cdot 2562.5 \cdot \frac{8}{2} \cdot 0.06 \cdot \sin 70 = 288.96 \text{ N} \quad (14)$$

Tloušťka třísky při vrtání:

$$h_d = f_z \cdot \sin \kappa_r = 0,06 \cdot \sin 70 = 0,056 \text{ mm} \quad (15)$$

Šířka třísky při vrtání:

$$b_D = \frac{D_v}{2 \cdot \sin \kappa_r} = \frac{6}{2 \cdot \sin 70} = 3,19 \text{ mm} \quad (16)$$

Průřez třísky při vrtání:

$$A_D = h_D \cdot b_D = 0,056 \cdot 3,19 = 0,18 \text{ mm}^2 \quad (17)$$

Řezná síla při vrtání:

$$F_{Cv} = k_{Cv} \cdot A_D = 2562,5 \cdot 0,18 = 461,25 \text{ N} \quad (18)$$

### 4.3 Volba vřetena

Z hlediska rozsahu diplomové práce není zahrnut návrh vlastního vřetene na požadované řezné podmínky. Vřeteno bude vybráno z katalogů výrobců dle potřebného kroutícího momentu vypočteného v předchozí kapitole. K výběru nám slouží výkonově-momentová charakteristika obr. 18 a obr. 19.

Vřetena pro frézky se vyrábí v mnoha provedeních o různých výkonech - od několika stovek wattů až po několik desítek kilowattů. Výkon vřetene pro malé frézky se bude pohybovat v řadě jednotek kilowattů. Výrobou vřeten o výkonech do 10kW se zabývá několik firem, v této kapitole budou porovnány dvě vřetena podobného výkonu od společnosti Teknomotor a HSDUUSA.

První vřeteno o výkonu 3,3 kW je od italského výrobce Teknomotor. Vřeteno je opatřeno dvojitém kosoúhlým čelním ložiskem umožňující použití při axiálním i radiálním zatížení. Nižší řada SB téhož výrobce s použitím jednoduchého čelního ložiska je uzpůsobena převážně pro radiální zatížení. Frézka má být co nejvíce univerzální, počítá se s vrtáním, z toho důvodu taková vřeteno nepřipadá v úvahu. [15]



Obr. 16) Vřeteno Teknomotor C51/60-A-DB-P 3.3kW [15]

Vřeteno MT1073 obr.16 k porovnání od americké společnosti HSD mechatronics disponuje výkonem 3kW. Jedná se o profesionální vřeteno, avšak patří do nejnižší kategorie



zmíněné společnosti. Ta se zabývá výrobou velice výkonných a kvalitních vřeten až do výkonu 30kw. V portfoliu sortimentu nabízí i nízko výkonná vřetena s automatickou výměnou nástrojů vhodná i pro malé frézky. V práci nebude automatická výměna nástrojů řešena. Frézka bude využívána pro občasné úkony, kde není zapotřebí automatická výměna. [16]

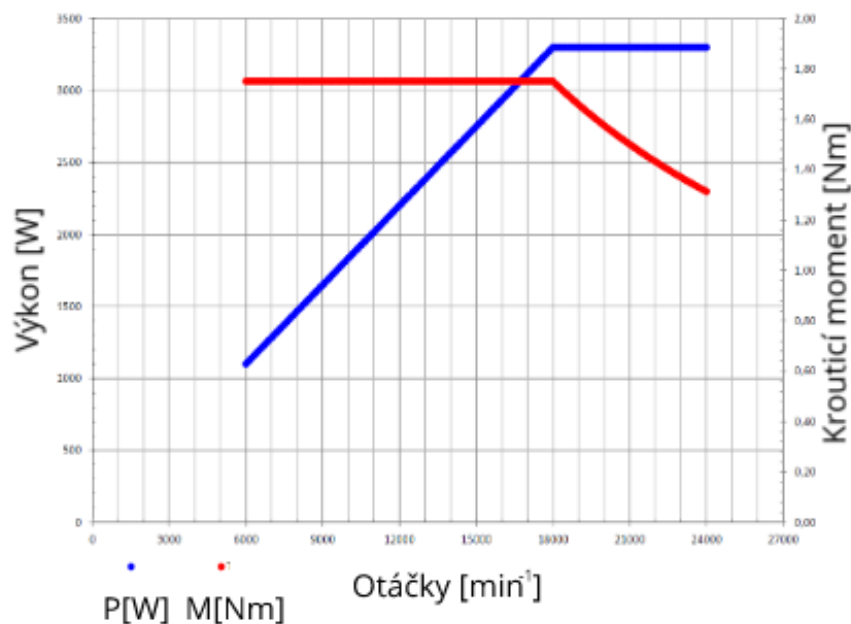


Obr. 17) Vřeteno HSD MT1073 3 [17]

Tab 11) Porovnání technický parametrů vřeten

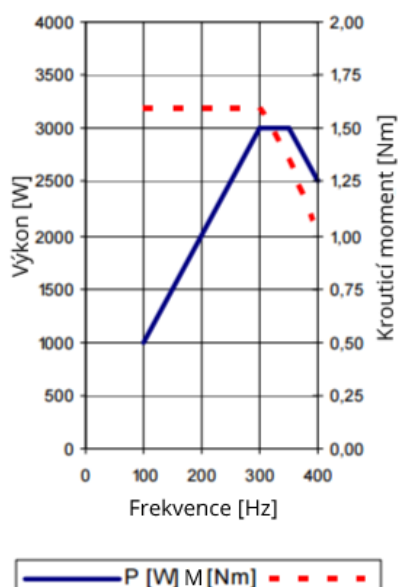
Výrobce	Teknomotor	HSD mechatronics
Model	C51/60-A-DB-P	MT1073
Výkon	3,3 [kW]	3 [kW]
Rozsah otáček	6000-24000 [ot/min]	6000-24000 [ot/min]
Zdroj	230 [V]	380 [V]
Kleštinový upímač	ER25	ER25
Chlazení	Vzduch	Vzduch

Při volbě vřetene je potřeba dbát, aby disponoval dostačujícím momentem při daných otáčkách vypočtených v předchozích kapitolách. K volbě nám slouží výkonově momentová charakteristika, která je znázorněná na obr.17 Z výpočtu je zřejmé, že budou kladeny vyšší nároky na vřeteno při operaci frézování, dle kterých se vhodně zvolí vřeteno o požadovaném výkonu. Z výpočtu vychází minimální potřebný moment 1,21 Nm při 6366 ot/min. a při výběru vhodného vřetene se musí vycházet z těchto parametrů.



Obr. 18) Výkonově-momentová charakteristika vřetene DB [18]

Výrobce HSD mechatronics uvádí charakteristiku závislou na frekvenci, která je ekvivalentní k hodnotě ot/min. Při frekvenci 100 Hz jsou otáčky rovny 6000 ot/min, každých 100 Hz představuje zvýšení o 6000 ot/min.



Obr. 19) Výkonově-momentová charakteristika vřetene HSD [19]

Z uvedených informací je patrné, že parametry a charakteristika porovnávaných vřeten jsou velice podobná. Nedá se určit, které vřeteno je lepší, mají podobný výkon, stejný rozsah otáček a o kvalitě zpracování nemůže být posuzováno bez důkladnějšího otestování. Ale vřeteno C51/60-A-DB-P vykazuje vyšší krouťicí moment při stejném výkonu a je schopné pokrýt požadovaný krouťicí moment. Navíc vřeteno od společnosti Teknomotor je znatelně

levnější a dostupnější. Z toho důvodu bylo voleno právě vřeteno C51/60-A-DB-P o výkonu 3kW.

Nedílnou součástí vřetene je frekvenční měnič, pomocí kterého se nastavují potřebné otáčky. Dle výrobce je doporučen frekvenční měnič od společnosti Delta Electronics VFD037EL43A poskytující výstupní výkon 3,7 kW. Alternativou je např. VF-S15 od výrobce Toshiba, který nabízí široký rozsah výstupních výkonů, ale jejich cena několikanásobně převyšuje pořizovací náklady konkurenta.

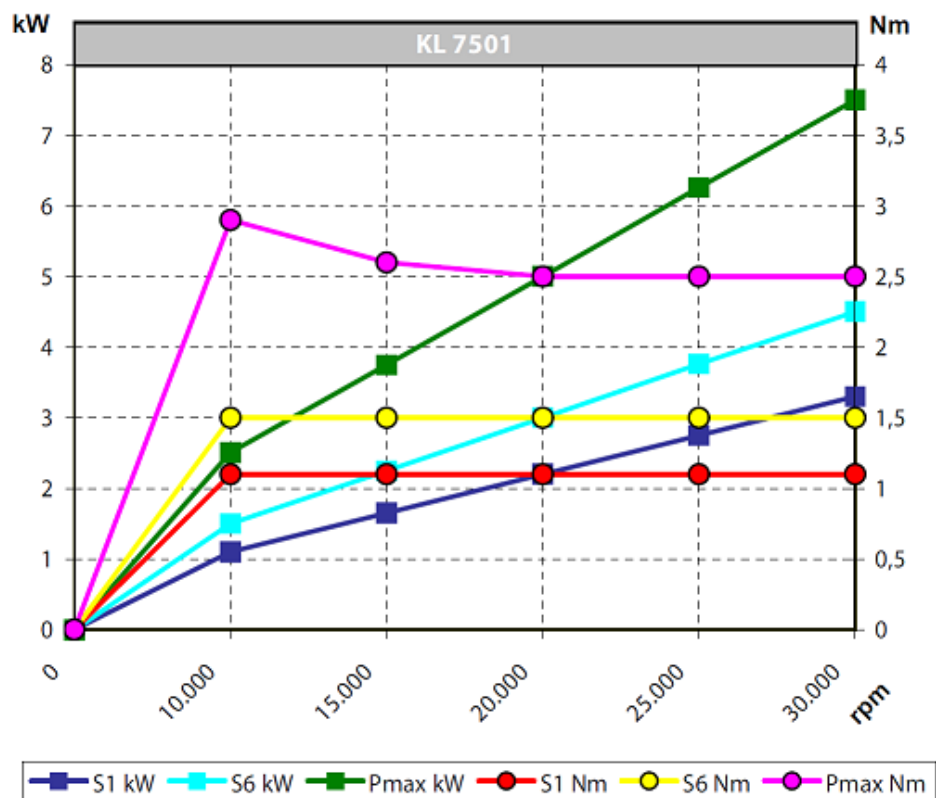


Obr. 20) Frekvenční měnič Delta Electronics VFD037EL43A [20]

Frézka bude připravena pro použití vřetene s automatickou výměnou nástroje. Vhodným vřetenem pro navrženou frézku je vřeteno do společnosti Jäger s jmenovitým výkonem 3,3 kW. Z obr. 21. je patrné, že dané vřeteno bude mít při 6000 ot/min přibližně 1Nm, což je dostačující krouticí moment.



Obr. 21) Vřeteno Jäger Chopper 3300 HSK S5A [23]



Obr. 22) Momentově-výkonová charakteristika vřetene 3300HSK [23]

#### 4.4 Řešení lineární posuvové soustavy

U konstrukce kompaktních frézovacích strojů se setkáváme nejčastěji s řešením v podobě pohybového šroubu. Použití ozubeného hřebene a pastorku je konstrukčně, a především rozměrově náročnější, a z toho důvodu je nevhodné u tak malých strojů. U nejjednodušší varianty, trapézového šroubu s kluznou maticí, vzniká velké tření a umožňuje poměrně malé posuvové rychlosti. Proto se u CNC strojů objevuje pouze zřídka, a to většinou u hobby frézek z důvodu pořizovací ceny. Druhou možnou variantou je použití kuličkového šroubu, u něhož vzniká valivé tření. Kuličkový šroub má vysokou účinnost a lze zajistit vymezení vůle. Proto se může používat i v nejpřesnějších aplikacích. [21]

Pro konstrukci kompaktní frézky budou použity z výše uvedených důvodů kuličkové šrouby pro všechny tři osy. A to od firmy Hiwin průměru 16 mm ve spojení s předepnutou maticí DDB1605-R-3EF obr. 22. Lineární posuvová soustava pro osu Z není samosvorná, proto musí být opatřena brzdou, která zamezí samovolný pohyb vřetene. Výběr brzdy bude popsán u volby servo-pohonů. [21]

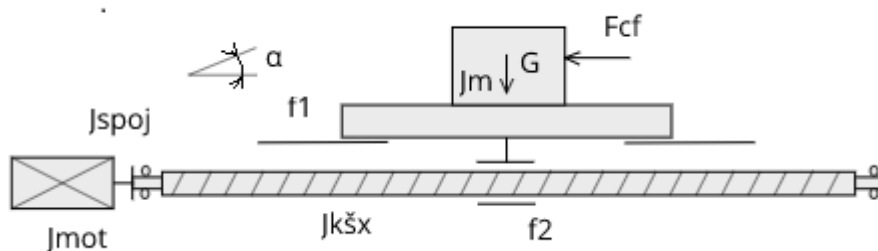


Obr. 23) Dvojitá předepnutá matice DDB [22]

#### 4.4.1 Výpočet pohonu osy X

Pro pohon osy X je použit okružovaný kuličkový šroub s vnějším průměrem 16 mm nesoucí označení DDB1605R-1200-X-P5. Chceme zamezit výskytu vůle, proto je volena dvojitá předepnutá matice s označením DDB1605-R-3EF. Jedná se nejmenší nabízený průměr společností Hiwin, avšak pro naši aplikaci bude plně dostačující. U servo-pohonu bude šroub uložen axiálně i radiálně nepohyblivě, ale na opačném konci je dovolena axiální vůle z důvodu tepelné dilatace. Uložení šroubu bude provedeno pomocí tzv. ložiskových domečků SFA-10 a SLA-10. Domeček přírubové kuličkové matice je zvolen GFD-16, který je výškově sladěn s domečkem pro uložení šroubu. Konec kuličkového šroubu musí být upraven dle doporučení výrobce. [22]

Frézka bude řešena pevným portálem s posuvným stolem. Z toho důvodu, že bude osa x poháněna jedním kuličkovým šroubem, musí být zahrnuta hmotnost pracovního stolu a maximální hmotnost polotovaru.



Obr. 24) Schéma posuvové soustavy osy x

Tab 12) Parametry pro návrh posuvové soustavy pro osu X [21] [22]

Název	Hodnoty
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	$d_{js} = 0.016 \text{ m}$
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	$d_k = 0.0135 \text{ m}$
Stoupání kuličkového šroubu	$s = 0.005 \text{ m}$
Dynamická tuhost kuličkového šroubu	$C_{dyn} = 9600 \text{ N}$
Statická tuhost kuličkového šroubu	$C_o = 12700 \text{ N}$
Koeficient v závislosti na uložení pro otáčky	$k_d = 1.88$
Koeficient v závislosti na uložení pro vzpěr	$k_k = 2.05$
Úhel sklonu vedení	$\alpha = 0^\circ$
Účinnost kuličkového šroubu	$\mu_s = 0.92$
Účinnost valivého vedení	$\mu_v = 0.98$
Účinnost pro oboustranné uložení v kuličkových ložiskách	$\mu_L = 0.92$
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	$f_1 = 0.005$
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukovaný na poloměr šroubu	$f_2 = 0.003$
Hmotnost stolu	$m_s = 20 \text{ kg}$
Maximální hmotnost polotovaru	$m_{pmax} = 80 \text{ kg}$
Maximální rychlost posuvu	$v_{max} = 0.09 \text{ m/s}$
Řezná síla při frézování	$F_f = 378,84 \text{ N}$
Vzdálenost mezi ložisky	$l_x = 0.64 \text{ m}$
Čas rozběhu	$t = 1 \text{ s}$

Výpočty jsou provedeny dle metodiky popsané v literaturách [22] [23]

Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu:

$$n_s = \frac{60 \cdot v_{max}}{s} = \frac{60 \cdot 0.09}{0.005} = 1080 \text{ ot/min} \quad (19)$$

Kritické otáčky:

$$n_k = k_d \cdot \frac{d_k}{l_{dx}^2} \cdot 10^5 = 1.88 \cdot \frac{0.0135}{0.64^2} \cdot 10^5 = 6196.29 \text{ ot/min} \quad (20)$$

Maximální přípustné otáčky:

$$n_{max} = 0.8 \cdot n_k = 0.8 \cdot 6196.29 = 4957.03 \text{ ot/min} \quad (21)$$

Kontrola DN faktoru:

$$D_N = d_{js} \cdot n_s \cdot 1000 = 0.016 \cdot 1080 \cdot 1000 = 17280 \quad (22)$$

Pro okružovaný šroub je DN faktor  $D_{Nmax} = 90000$

$$D_N < D_{Nmax}$$

$$17280 < 90000 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Přípustné axiální zatížení kuličkového šroubu:

$$F_k = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_{dx}^2} \cdot 10^{11} = 2.05 \cdot \frac{0.0135^4}{0.64^2} \cdot 10^{11} = 16623.75 \text{ N} \quad (23)$$

Maximální přípustné zatížení šroubu:

$$F_{kmax} = F_k \cdot 0,5 = 16623.75 \cdot 0.5 = 8311.87 \text{ N} \quad (24)$$

Kontrola vzpěrné tuhosti:

$$F_f < F_{kmax}$$

$$302.4 < 5319.6 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách:

$$L_h = \left( \frac{C_{dyn}}{F_f} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_s \cdot 60} = \left( \frac{9600}{302.4} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{1080 \cdot 60} = 496734.34 \text{ h} \quad (25)$$

$$L_h = \left( \frac{C_{dyn}}{F_f} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_s \cdot 60} = \left( \frac{9600}{302.4} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{1080 \cdot 60} = 496734.34 \text{ h}$$

Celková účinnost stanovena odhadem hodnot:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,8295 \quad (26)$$

Minimální potřebný moment:

$$M_x = \frac{F_f \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{302.4 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,8295} = 0,29 \text{ Nm}$$

Lineární zrychlení osy X:

$$a_x = \frac{v_{max}}{t} = \frac{0,09}{1} = 0,09 \text{ m/s}^2 \quad (27)$$

Požadované úhlové zrychlení kuličkového šroubu:

$$\epsilon_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_x}{s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,09}{0,005} = 113 \text{ rad/s}^2 \quad (28)$$

Předepnutí kuličkového šroubu:

$$F_p = 0,35 \cdot F_{cf} = 0,35 \cdot 302.4 = 105.84 \text{ N} \quad (29)$$

Zátěž pohonu od tíhové složky:

$$M_{GTx} = \frac{(m_s + m_{pmax}) \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{(20 + 80) \cdot 9,81 \cdot \sin 0 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,8295} = 0 \text{ Nm} \quad (30)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v KŠM:

$$M_{KŠMx} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_L} \cdot (1 - \mu_s^2) + \frac{0,5 \cdot (m_s + m_{pmax}) \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{js} \cdot f_2}{\eta_L} \quad (31)$$

$$M_{KŠMx} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_L} \cdot (1 - \mu_s^2) + \frac{0,5 \cdot (m_s + m_{pmax}) \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{js} \cdot f_2}{\eta_L}$$

$$M_{KŠMx} = \frac{105.8 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,92} \cdot (1 - 0,92^2) + \frac{0,5 \cdot (20 + 80) \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,016 \cdot 0,003}{0,92}$$

$$M_{KŠMx} = 0,014 \text{ Nm}$$

Moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot:

$$M_{Gx} = \frac{(m_s + m_{pmax}) \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_L \cdot \eta_s} = \frac{(20 + 80) \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,92 \cdot 0,92} = 0,005 \text{ Nm} \quad (32)$$

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru:

$$M_{zrnhx} = M_{GTx} + M_{KSMx} + M_{Gx} = 0 + 0,014 + 0,005 = 0,019 \text{ Nm} \quad (33)$$

Moment setrvačnosti posuvných hmot redukováný do osy šroubu:

$$J_{mx} = (m_s + m_{pmax}) \cdot \left(\frac{s}{2 \cdot \pi}\right)^2 = (20 + 80) \cdot \left(\frac{0,005}{2 \cdot \pi}\right)^2 = 6,33 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (34)$$

Tab 13) Momenty setrvačnosti součástí osy x

Název	Hodnoty
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy x	$J_{ksx} = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti krokového motoru	$J_{mot} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti pružné spojky	$J_{spoj} = 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru:

$$J_{crhm} = J_{mx} + J_{ksx} + J_{mot} + J_{spoj} = 6,33 \cdot 10^{-5} + 2,5 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-5} + 4,5 \cdot 10^{-6} = 1,43 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (35)$$

Minimální potřebný moment dle dynamického hlediska:

$$M_{xd} = J_{crhm} \cdot \epsilon_m + M_{zrnhx} = 1,43 \cdot 10^{-4} \cdot 113 + 0,019 = 0,035 \text{ Nm} \quad (36)$$

Kontrola kvality dynamických poměrů:

$$\frac{J_{crhm}}{J_{mot}} = \frac{1,43 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-5}} = 2,86 \quad (37)$$

Poměr mezi momentem setrvačnosti redukováným na hřídel motoru a momentem setrvačnosti motoru by měl ležet v intervalu 1,5-3. [21]

#### 4.4.2 Výpočet pohonu osy Y

U osy Y je z konstrukčních důvodů převod rotačního pohybu ze servo-pohonu na kuličkový šroub řešen synchronním řemenem a řemenicemi s převodovým poměrem rovnému 1. Hlavní důvod použití řemenového převodu byl minimalizovat šířku stroje. Pohon by zbytečně zvyšoval šířku frézky přinejmenším o 150 mm. Rozměr řemenic byl zvolen s ohledem na možnost upravení náboje pro upnutí k hřídeli pomocí svěrného pouzdra, kde minimální rozměr náboje řemenice u servo-pohonu je 14 mm, což vyplývá z rozměrů svěrného pouzdra TLK 110 6x14 od společnosti TEA TECHNIK. U kuličkového šroubu je použito svěrné pouzdro TLK 110 10x16. Vybrané řemenice s označením HTD 20-05M-09 jsou dodávány výrobcem TYMA. Výpočet řemenového převodu byl proveden použitím softwaru Transmission Designer společnosti Contitech, od které je dodáván použitý řemen HTD 5M o šířce 9 mm. Na obr. 27 je zobrazen výstup z programu Transmission Designer. Ostatní komponenty jsou totožné jako u osy X, kromě uložení kuličkového šroubu. Zde jsou použity přírubové ložiskové domečky FF-10 a FK-10 dodávané společností Hiwin obr. 25 a 26.





Obr. 25) Přírubový ložiskový domeček FF-10 [22]

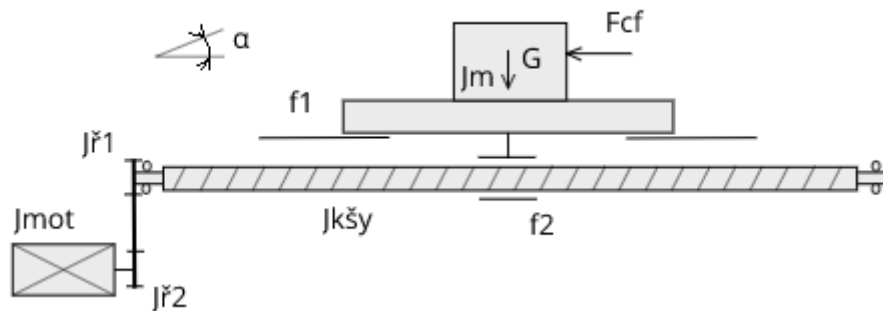


Obr. 26) Přírubový ložiskový domeček FK-10 [22]

Conti CONTI SYNCHROFORCE CXP HTD

Tooth profile	PROF	=	5M	
Tooth pitch	T	=	5,00	mm
Number of teeth on small pulley	ZK	=	20	
Pitch diameter of small pulley	DWK	=	31,83	mm
Number of teeth on large pulley	ZG	=	20	
Pitch diameter of large pulley	DWG	=	31,83	mm
Speed of small pulley	NK	=	1080,00	rpm
Speed of large pulley	NG	=	1080,00	rpm
Transmission ratio	I	=	1,00	
Belt length	LW	=	375,00	mm
Number of teeth on timing belt	Z	=	75,00	
Centre distance	AER	=	137,50	mm
Arc of contact on the small pulley	BETA	=	180,00	grd
Number of teeth in mesh on small pulley	ZE	=	10,00	
Belt speed	V	=	1,80	m/s
Belt flex frequency	BF	=	9,60	Hz
Overall service factor	C0	=	1,60	
Teeth in mesh factor	C1	=	1,00	
Length factor	C5	=	0,80	
Power to be transmitted	P	=	0,13	kW
Torque on small pulley	MDK	=	1,15	Nm
Torque on large pulley	MDG	=	1,15	Nm
Calculated belt width	BERR	=	3,96	mm
Chosen belt width	B	=	9,00	mm
Power rating for belt width	PR	=	0,72	kW
Calculated overall service factor	C0ER	=	5,51	
Effective pull	FU	=	72,26	N
Static belt tension	FSTAT	=	58,50	N
Total axle load	FV	=	117,00	N
Belt tension load factor	k1	=	1,00	
Belt tension service factor	k2	=	1,60	
Natural frequency of belt span	EIF	=	159	Hz

Obr. 27) Výstup ze softwaru Transmission Designer [27]



Obr. 28) Schéma posuvové soustavy osy Y

Tab 14) Parametry pro návrh posuvové soustavy osy Y [22] [21]

Název	Hodnoty
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	$d_{js} = 0.016 \text{ m}$
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	$d_k = 0.0135 \text{ m}$
Stoupání kuličkového šroubu	$s = 0.005 \text{ m}$
Dynamická tuhost kuličkového šroubu	$C_{dyn} = 9600 \text{ N}$
Statická tuhost kuličkového šroubu	$C_o = 12700 \text{ N}$
Koeficient v závislosti na uložení pro otáčky	$k_d = 1.88$
Koeficient v závislosti na uložení pro vzpěr	$k_k = 2.05$
Úhel sklonu vedení	$\alpha = 0^\circ$
Účinnost kuličkového šroubu	$\mu_s = 0.92$
Účinnost valivého vedení	$\mu_v = 0.98$
Účinnost pro oboustranné uložení v kuličkových ložiskách	$\mu_L = 0.92$
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	$f_1 = 0.005$
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukovaný na poloměr šroubu	$f_2 = 0.003$
Celková přesouvaná hmotnost	$m_{cp} = 35 \text{ kg}$
Maximální rychlost posuvu	$v_{max} = 0.09 \text{ m/s}$
Řezná síla při frézování	$F_{cf} = 302,4 \text{ N}$
Vzdálenost mezi ložisky	$l_y = 0.8 \text{ m}$
Čas rozběhu	$t = 1 \text{ s}$

Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu:

$$n_s = \frac{60 \cdot v_{max}}{s} = \frac{60 \cdot 0.09}{0.005} = 1080 \text{ ot/min} \quad (38)$$

Kritické otáčky:

$$n_k = k_d \cdot \frac{d_k}{l_y^2} \cdot 10^5 = 1.88 \cdot \frac{0.0135}{0.8^2} \cdot 10^5 = 3965,63 \text{ ot/min} \quad (39)$$

Maximální přípustné otáčky:

$$n_{max} = 0,8 \cdot n_k = 0,8 \cdot 3965,63 = 3172,5 \text{ ot/min} \quad (40)$$

Kontrola DN faktoru:

$$D_N = d_{j\check{s}} \cdot n_{\check{s}} \cdot 1000 = 0,016 \cdot 1080 \cdot 1000 = 17280 \quad (41)$$

Pro okružovaný šroub je DN faktor  $D_{nmax}=90000$

$$D_N < D_{Nmax}$$

$$17280 < 90000 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Přípustné axiální zatížení kuličkového šroubu:

$$F_k = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_y^2} \cdot 10^{11} = 2,05 \cdot \frac{0,0135^4}{0,8^2} \cdot 10^{11} = 12974,63 \text{ N} \quad (42)$$

Maximální přípustné zatížení šroubu:

$$F_{kmax} = F_k \cdot 0,5 = 12974,63 \cdot 0,5 = 6487,32 \text{ N} \quad (43)$$

Kontrola vzpěrné tuhosti:

$$F_{cf} < F_{kmax}$$

$$378,84 < 6487,32 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách:

$$L_h = \left( \frac{C_{dyn}}{F_{cf}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_{\check{s}} \cdot 60} = \left( \frac{9600}{302,4} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{1080 \cdot 60} = 496734,34 \text{ h} \quad (44)$$

Celková účinnost stanovena odhadem hodnot:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_{\check{s}} \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,8295 \quad (45)$$

Minimální potřebný moment:

$$M_y = \frac{F_{cf} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{302,4 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,8295} = 0,29 \text{ Nm} \quad (46)$$

Lineární zrychlení osy X:

$$a_y = \frac{v_{max}}{t} = \frac{0,09}{1} = 0,09 \text{ m/s}^2 \quad (47)$$

Požadované úhlové zrychlení kuličkového šroubu:

$$\epsilon_{\check{s}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_x}{s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,09}{0,005} = 113 \text{ rad/s}^2 \quad (48)$$

Předeptnutí kuličkového šroubu:

$$F_p = 0,35 \cdot F_{cf} = 0,35 \cdot 302,4 = 105,4 \text{ N} \quad (49)$$

Zátěž pohonu od tíhové složky:

$$M_{GTy} = \frac{m_{cp} \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{35 \cdot 9,81 \cdot \sin 0 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,92} = 0 \text{ Nm} \quad (50)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v KŠM:

$$M_{KŠMy} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_L \cdot \eta_p} \cdot (1 - \mu_s^2) + \frac{0,5 \cdot m_{cp} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{j\dot{s}} \cdot f_2}{\eta_L \cdot \eta_p} \quad (51)$$

$$M_{KŠMy} = \frac{105,8 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,92 \cdot 0,99} \cdot (1 - 0,92^2) + \frac{0,5 \cdot 35 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,016 \cdot 0,003}{0,92 \cdot 0,99}$$

$$M_{KŠMy} = 0,014 \text{ Nm}$$

Moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot:

$$M_{Gy} = \frac{m_{cp} \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_L \cdot \eta_s \cdot \eta_p} = \frac{35 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 0 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,92 \cdot 0,92 \cdot 0,99} = 0,0016 \text{ Nm} \quad (52)$$

Celkový moment zátěže redukováný na hřídel motoru:

$$M_{zrnhy} = M_{GTy} + M_{KŠMy} + M_{Gy} = 0 + 0,014 + 0,0016 = 0,016 \text{ Nm} \quad (53)$$

Moment setrvačnosti posuvných hmot redukováný do osy šroubu:

$$J_{my} = m_{cp} \cdot \left( \frac{s}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 35 \cdot \left( \frac{0,005}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (54)$$

Tab 15) Momenty setrvačností součástí osy y

Název	Hodnoty
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy y	$J_{k\dot{s}y} = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti krokového motoru	$J_{mot} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti řemenice	$J_{\dot{r}} = J_{\dot{r}1} = J_{\dot{r}2} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru:

$$J_{crhm} = J_{my} + J_{k\dot{s}y} + J_{mot} + 2 \cdot J_{\dot{r}}$$

$$= 2,22 \cdot 10^{-5} + 3,2 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-5} + 2 \cdot 5 \cdot 10^{-6}$$

$$J_{crhm} = 1,09 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Minimální potřebný moment dle dynamického hlediska:

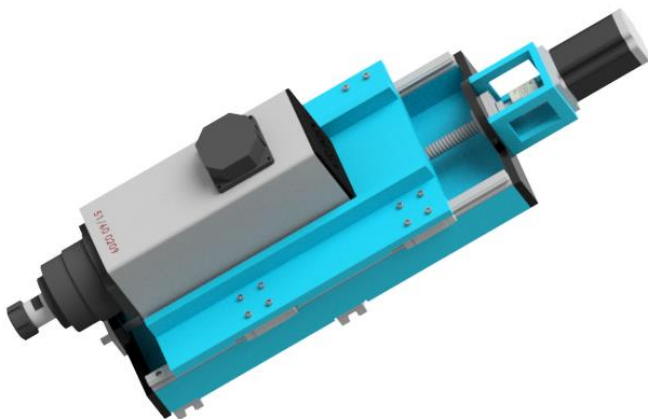
$$M_{yd} = J_{crhm} \cdot \epsilon_m + M_{zrnhy} = 1,09 \cdot 10^{-4} \cdot 113 + 0,016 = 0,028 \text{ Nm} \quad (56)$$

Kontrola kvality dynamických poměrů:

$$\frac{J_{crhm}}{J_{mot}} = \frac{1,09 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-5}} = 2,18 \quad (57)$$

#### 4.4.3 Výpočet pohonu osy Z

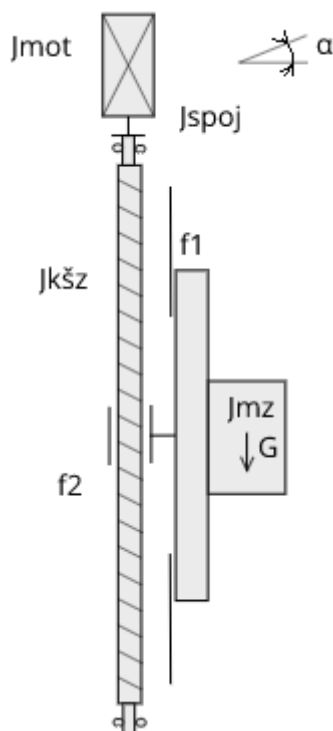
U posuvové soustavy osy Z je spojen kuličkový šroub s pohonem pomocí pružné spojky LK20-C25 obr. 30. Uložení kuličkového šroubu je totožné, jako u osy Y. Ostatní komponenty jsou stejné jako u všech os. U osy Z je zapotřebí opatřit pohon brzdou, aby nedocházelo při výpadku proudu k samovolnému sjíždění vřetene. Tato brzda je přímo součástí navrženého pohonu. Pro představu o navrhované části je na obr. 29 model sestavy vřeteníku a saní.



Obr. 29) Sestava vřeteníku a saní



Obr. 30) Pružná spojka LK20/C25 [24]



Obr. 31) Schéma pohybové soustavy osy Z

Tab 16) Parametry pro návrh posuvové soustavy pro osu Z [21] [22]

Název	Hodnoty
Jmenovitý průměr kuličkového šroubu	$d_{js} = 0.016 \text{ m}$
Malý průměr závitu kuličkového šroubu	$d_k = 0.0135 \text{ m}$
Stoupání kuličkového šroubu	$s = 0.005 \text{ m}$
Dynamická tuhost kuličkového šroubu	$C_{dyn} = 9600 \text{ N}$
Statická tuhost kuličkového šroubu	$C_o = 12700 \text{ N}$
Koeficient v závislosti na uložení pro otáčky	$k_d = 0,42$
Koeficient v závislosti na uložení pro vzpěr	$k_k = 0,26$

Úhel sklonu vedení	$\alpha=90^\circ$
Účinnost kuličkového šroubu	$\mu_s=0.92$
Účinnost valivého vedení	$\mu_v=0.98$
Účinnost pro oboustranné uložení v kuličkových ložiskách	$\mu_L=0.92$
Součinitel tření ve vodících plochách valivého vedení	$f_1=0.005$
Ekvivalentní součinitel tření v kuličkovém šroubu redukovaný na poloměr šroubu	$f_2=0.003$
Hmotnost vřeteníku	$m_v=20 \text{ kg}$
Maximální rychlost posuvu	$v_{\max}= 0.05 \text{ m/s}$
Řezná síla při frézování	$F_{cf} = 302,44 \text{ N}$
Vzdálenost mezi ložisky	$l_z=0.45\text{m}$
Čas rozběhu	$t=1\text{s}$

Otáčky kuličkového šroubu při rychloposuvu:

$$n_s = \frac{60 \cdot v_{\max}}{s} = \frac{60 \cdot 0.05}{0.005} = 600 \text{ ot/min} \quad (58)$$

Kritické otáčky:

$$n_k = k_d \cdot \frac{d_k}{l_z^2} \cdot 10^5 = 0.42 \cdot \frac{0.0135}{0.45^2} \cdot 10^5 = 2800 \text{ ot/min} \quad (59)$$

Maximální přípustné otáčky:

$$n_{\max} = 0,8 \cdot n_k = 0.8 \cdot 2800 = 2240 \text{ ot/min} \quad (60)$$

Kontrola DN faktoru:

$$D_N = d_{js} \cdot n_s \cdot 1000 = 0.016 \cdot 600 \cdot 1000 = 9600 \quad (61)$$

Pro okružovaný šroub je DN faktor  $D_{N\max}=90000$

$$D_N < D_{N\max}$$

$$9600 < 90000 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Přípustné axiální zatížení kuličkového šroubu:

$$F_k = k_k \cdot \frac{d_k^4}{l_z^2} \cdot 10^{11} = 0,26 \cdot \frac{0.0135^4}{0.45^2} \cdot 10^{11} = 4264,65 \text{ N} \quad (62)$$

Maximální přípustné zatížení šroubu:

$$F_{k\max} = F_k \cdot 0,5 = 4264,65 \cdot 0.5 = 2132,33 \text{ N} \quad (63)$$

Kontrola vzpěrné tuhosti:

$$F_{cf} < F_{k\max}$$

$$302,4 < 2132,33 \rightarrow \text{Vyhovuje}$$

Životnost kuličkového šroubu v provozních hodinách:

$$L_h = \left( \frac{C_{dyn}}{F_{cf}} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{n_s \cdot 60} = \left( \frac{9600}{302,4} \right)^3 \cdot \frac{10^6}{600 \cdot 60} = 888722 \text{ h} \quad (64)$$

Celková účinnost stanovena odhadem hodnot:

$$\eta_c = \eta_v \cdot \eta_s \cdot \eta_L = 0,98 \cdot 0,92 \cdot 0,92 = 0,8295 \quad (65)$$

Minimální potřebný moment:

$$M_x = \frac{F_{cf} \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{302,4 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,8295} = 0,29 \text{ Nm} \quad (66)$$

Lineární zrychlení osy Z:

$$a_z = \frac{v_{max}}{t} = \frac{0,05}{1} = 0,05 \text{ m/s}^2 \quad (67)$$

Požadované úhlové zrychlení kuličkového šroubu:

$$\epsilon_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot a_z}{s} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,05}{0,005} = 62,8 \text{ rad/s}^2 \quad (68)$$

Předepnutí kuličkového šroubu:

$$F_p = 0,35 \cdot F_{cf} = 0,35 \cdot 302,4 = 105,84 \text{ N} \quad (69)$$

Zátěž pohonu od tíhové složky:

$$M_{GTz} = \frac{m_v \cdot g \cdot \sin \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_c} = \frac{20 \cdot 9,81 \cdot \sin 90 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,8295} = 0,188 \text{ Nm} \quad (70)$$

Ztrátový moment pasivních odporů způsobený odporem v KŠM:

$$M_{KŠMz} = \frac{F_p \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_L} \cdot (1 - \mu_s^2) + \frac{0,5 \cdot m_v \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot d_{js} \cdot f_2}{\eta_L} \quad (71)$$

$$M_{KŠMz} = \frac{105,8 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,92} \cdot (1 - 0,92^2) + \frac{0,5 \cdot 20 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 90 \cdot 0,016 \cdot 0,003}{0,92}$$

$$M_{KŠMz} = 0,014 \text{ Nm}$$

Moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot:

$$M_{Gz} = \frac{m_v \cdot g \cdot f_1 \cdot \cos \alpha \cdot s}{2 \cdot \pi \cdot \eta_L \cdot \eta_s} = \frac{20 \cdot 9,81 \cdot 0,005 \cdot \cos 90 \cdot 0,005}{2 \cdot \pi \cdot 0,92 \cdot 0,92} = 0 \text{ Nm} \quad (72)$$

Celkový moment zátěže redukovaný na hřídel motoru:

$$M_{zrnHz} = M_{GTz} + M_{KŠMz} + M_{Gz} = 0,188 + 0,014 + 0 = 0,2 \text{ Nm} \quad (73)$$

Moment setrvačnosti posuvných hmot redukovaný do osy šroubu:

$$J_{mz} = m_v \cdot \left( \frac{s}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 20 \cdot \left( \frac{0,005}{2 \cdot \pi} \right)^2 = 2,01 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (74)$$

Tab 17) Momenty setrvačností součástí osy Z

Název	Hodnoty
Moment setrvačnosti kuličkového šroubu osy z	$J_{kšz} = 1,7 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti krokového motoru	$J_{mot} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Moment setrvačnosti brzdy	$J_{br} = 1 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Celkový moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru:

$$J_{crhm} = J_{mz} + J_{ksz} + J_{mot} + J_{br} = 2,01 \cdot 10^{-5} + 1,7 \cdot 10^{-5} + 5 \cdot 10^{-5} + 1 \cdot 10^{-5} \quad (75)$$

$$J_{crhm} = 9,7 \cdot 10^{-5} kg \cdot m^2$$

Minimální potřebný moment dle dynamického hlediska:

$$M_{yd} = J_{crhm} \cdot \epsilon_m + M_{zrnhy} = 9,7 \cdot 10^{-5} \cdot 62,8 + 0,016 = 0,022 Nm \quad (76)$$

Kontrola kvality dynamických poměrů:

$$\frac{J_{crhm}}{J_{mot}} = \frac{9,7 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^{-5}} = 1,94 \quad (77)$$

#### 4.4.4 Volba pohonů

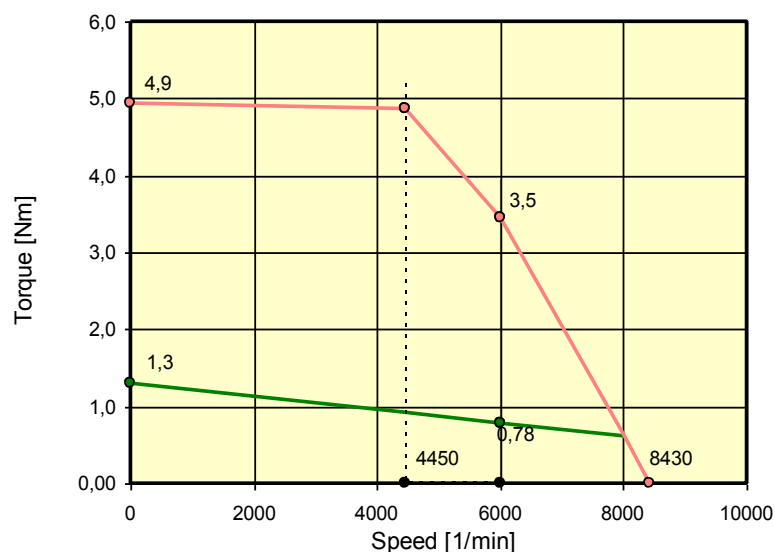
Na základě předchozích výpočtů byl zjištěn potřebný minimální moment jednotlivých os. Minimální potřebný moment činí 0,29Nm při 1080 ot/min. Volený servo-pohon od společnosti TG Drive byl zvolen s ohledem na dostačující moment při určitých otáčkách a hodnotě vlastního momentu setrvačnosti. A to z důvodu vyhovující kvality dynamických poměrů. Výsledný servopohon nese označení TGN2,5-0175-K s jmenovitým momentem 0,78 Nm při 6000 ot/min. Podle grafu na obr.33 je očividné, že zvolený servopohon bude disponovat několikanásobně vyšším krouticím momentem při daných otáčkách nežli je minimální požadovaný moment. Pro osu Z bude pohon vybaven brzdou, z důvodu zamezení nežádoucího samovolného pohybu.



Obr. 32) Servopohon TGN2,5-0175 [25]



**Torque/speed curves**



Obr. 33) Výkonově-momentová charakteristika servopohonu TGN2,5-0175 [25]

Ke zvolenému servopohonu je nutné vhodně vybrat tzv. servo-zesilovač. Ten bude od stejné společnosti. V úvahu přichází jeden model, a to AKD. Je možnost volby mezi dvěma vhodnými výkony - první servo-zesilovač AKD P00306 splňuje jmenovitý proud 3 A, ale špičkový proud dosahuje pouze 9 A a servo-pohon může ve špičkách jít až na 14,3A. Druhý výkonnější typ AKD P00606 má jmenovitý proud 6 A a špičkový 18 A, tím může být plně využit potenciál zvoleného servopohonu. Na základě posouzení bylo vhodnější zvolit výkonnější typ servo-zesilovače, a to zejména kvůli možnosti dosažení vyšší dynamiky stroje, právě kvůli vyššímu špičkovému proudu. Výsledný zesilovač AKD P00606 od společnosti TG Drives je zobrazen na obr.34.



Obr. 34) Servo-zesilovač AKD P00606 [25]

Tab 18) Základní technické parametry servo-zesilovače AKD P00606 [25]

Název	Hodnoty
Jmenovitý výkon	1,2 kVA
Jmenovitý proud	6 A
Špičkový proud	18 A
Napájení	230 V

#### 4.5 Konstrukční uzly

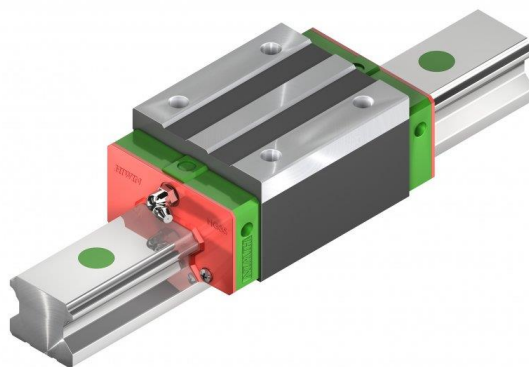
Celá konstrukce frézky se skládá ze tří základních částí, z lože s pojízdným stolem, pevného portálu a vřeteníku. V této kapitole budou představeny řešení jednotlivých částí. Pro dodržení stanovené přesnosti stroje jsme nuceni dodržet jisté geometrické přesnosti, kolmosti, rovnoběžnosti a rovinnosti. Konstrukce musí vykazovat především vysokou tuhost.

Konstrukce nosných částí frézky se mohou realizovat z různých druhů materiálu. Nejpoužívanějším materiálem nosných konstrukcí při realizaci obráběcích strojů je šedá litina ve formě odlitku. Její výhodou je vyšší materiálové tlumení a dobrá obrobitelnost. Tato technologie je vhodná pro velko-sériovou výrobu, což je zásadní důvod proč uvedená technologie nemůže být použita.

Druhým častým typem nosných částí je svařenec z ocelových desek nebo z uzavřených profilů. Výhodou této technologie je především možnost konstrukce velmi složitých a rozmanitých tvarů dle konstrukčních potřeb. Za nevýhodu se dá považovat horší obrobitelnost a vzniklé pnutí po svařování, které se musí dodatečně odstraňovat žiháním. Tato technologie je z ekonomického hlediska vhodná pouze pro kusovou a malosériovou výrobu. Pro návrh frézky řešené v diplomové práci je tato technologie vhodná.

V poslední době se začíná používat materiál polymer betonu, který má velice vysoký tlumicí účinek. Tento materiál používá např. firma AZK zmíněná v druhé části diplomové práce. Dalšími novými používanými materiály jsou kompozity na bázi uhlíkových vláken, keramické materiály na bázi hliníku a křemíku. Všechny zmíněné materiály mají mnoho výhod, ale jsou velice drahé.

U frézovacích strojů se setkáváme s použitím vodících tyčí, které jsou nejlevnější variantou vedení, vykazují nejnižší tuhost z možných vedení. Používají se u méně přesných strojů. Výhodou je jednoduchá montáž, která spočívá v uchycení obou konců vodící tyče. Podepřené tyče mají vyšší tuhost, ale velice záleží na kvalitě zpracování, snadno dostupné levné vodící tyče nemusí být tužší nežli kvalitní vodící tyče. Značnou nevýhodou oproti obyčejným vodícím tyčím je značně složitější montáž, kde je za potřebí přidělení podpěry tyče k rámu stroje po celé délce vedení. Nejlepším možným řešením je použití lineárního kuličkového vedení s profilovou kolejnicí. Její předností je vysoká tuhost, které je nejvyšší z uvedených vedení, ale s tím souvisí také vysoká pořizovací cena. Z hlediska zajištění co nejvyšší celkové tuhosti stroje jsou na všech osách jsou použity přesná lineární kuličková vedení HG15 od společnosti Hiwin obr.34). Společnost má v portfoliu miniaturní vedení, ale z konstrukčních důvodů nejsou použity. Zvolené vozíky mají vysokou dynamickou a statickou tuhost, kterých nemůže být reálně na konstruovaném stroji dosaženo.



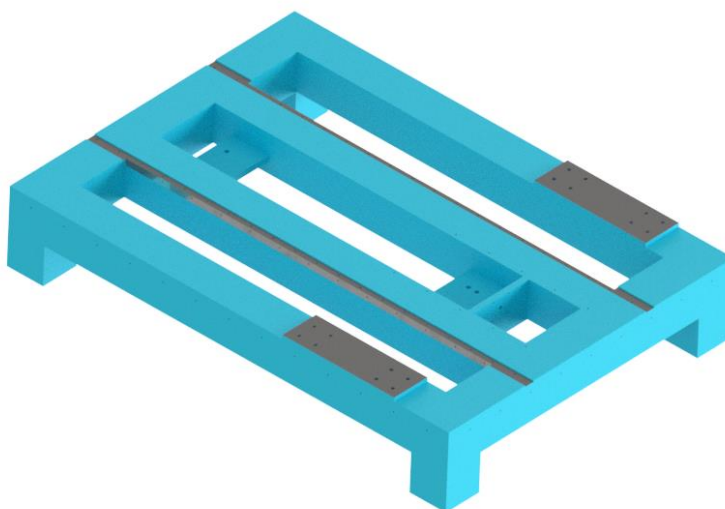
Obr. 35) Kuličkové vedení firmy Hiwin [22]

#### 4.5.1 Lože stroje

Lože stroje je řešeno svařencem z ocelových profilů o rozměru 100x100 mm tloušťky 8 mm. Je tvořen základním obdélníkovým rámem, kde ve středu jsou dva dodatečné profily, sloužící pro uložení kolejnic lineárního vedení. Dále jsou použity technologické desky pro upevnění servopohonů a uložení kuličkového šroubu dle obr.36.

V místě spojení s portálem musí být navařena deska pro zvýšení tloušťky stěny, a je potřeba mít dostatečnou délku závitů pro upevnění portálu. Celá plocha styku s portálem musí být frézovaná a broušená na předepsanou drsnost  $Ra=0,8$ . Mezi rovinami styku základny je nutné dodržet rovinnost a rovnoběžnost.

Do středních profilů budou vyfrézovány 3 mm hluboké a 15 mm široké technologické kapsy pro upevnění kolejnic lineárního vedení. Musí být dodrženy předepsané požadavky dle výrobce. Vzájemné rovnoběžnosti kolejnic je docíleno pomocí přítlačných rovnoběžných stěn, jak je vidět na obr.36, ke kterým jsou kolejnice přitlačeny pomocí přítlačných lišt. Rovnoběžnost kolejnic je třeba zkontrolovat a případně jednu z nich doladit podle hodinek.



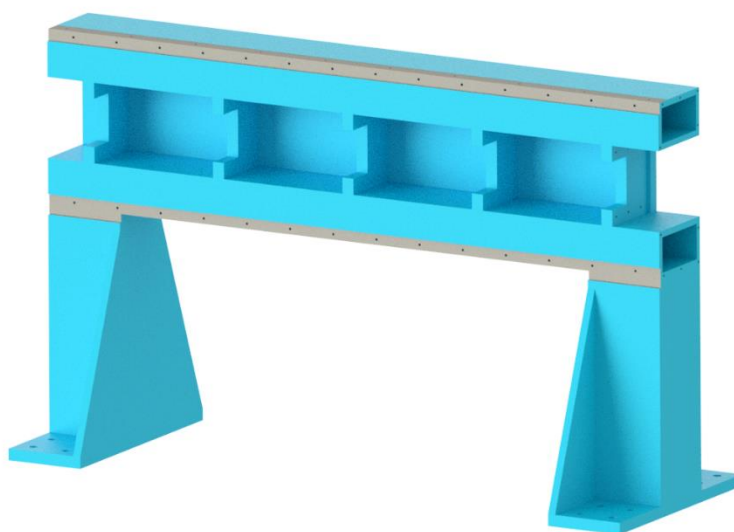
Obr. 36) Lože stroje

#### 4.5.2 Portál

Portál je dominantní částí celého stroje. V počátku návrhu frézky bylo zamýšleno o monolitní svařenec základny s portálem, ale z hlediska technologie nespílitelné. Takový rám by vykazoval nejvyšší tuhost a odpadli by problémy spojené s montáží.

Hlavní částí portálu je příčník, který je svařen ze dvou ocelových profilů obdélníkového průřezu o rozměrech 100x60 mm o tloušťce 8 mm, deskou o tloušťce 15 mm a vyztužený plechy o stejné tloušťce tvaru U dle obr.37. K příčníku jsou přivařeny sloupy s čtvercovým profilem 100x100 mm o tloušťce 8 mm a vyztužené plechy trojúhelníkového tvaru z obou stran. Na spodku celého svařeného dílu jsou patky pro spojení se základnou.

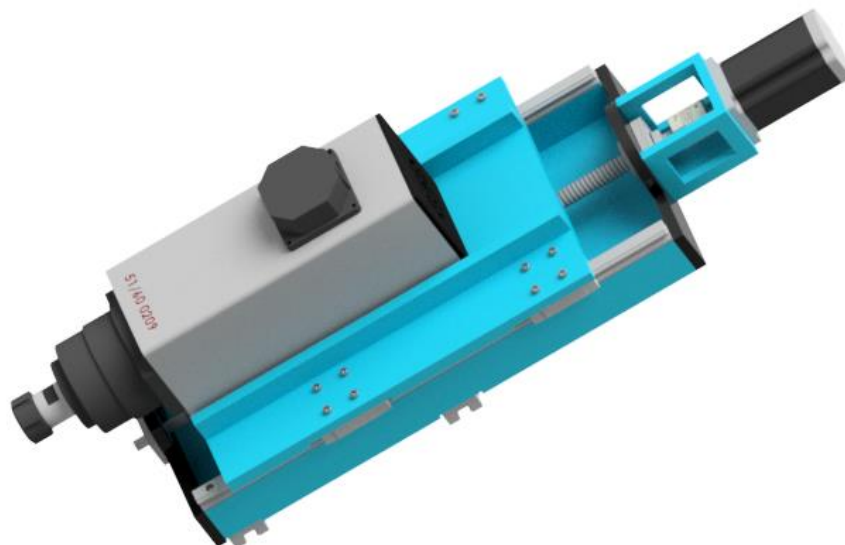
Patky musí být přesně obrobeny s dodržanou předepsanou tolerancí rovinnosti a vzájemné rovnoběžnosti. Dále musí být dodržena kolmost s dosedacími plochami pro kolejnice a rovnoběžnost s přítlačnou plochou kolejnic. Bude tak zajištěna kolmost kolejnic osy X s kolejnicemi osy Y.



Obr. 37) Portál stroje

#### 4.5.3 Saně a vřeteník

Saně tvarů U jsou řešeny ocelovou deskou o tloušťce 15 mm, ke které jsou přivařené dva výpalky tloušťky 20 mm. Po svaření je zapotřebí provést žíhání pro snížení vnitřních pnutí. Následně se obrobí funkční plochy pro uložení kolejnic lineárního vedení, funkční plocha pro přítlačnou lištu, plocha pro montáž domečku kuličkového šroubu a plochy pro montáž vozíku lineárního vedení. Na jedné straně je uložení kolejnice opatřeno referenční hranou, ke které je kolejnice přítlačena pomocí přítlačné lišty. Druhá kolejnice k ní bude nastavena dle hodin. Vzájemná rovnoběžnost vozíku je docílena pomocí referenční hrany, u které je předepsaná tolerance rovnoběžnosti. Je za potřebí se řídit pokyny výrobce.

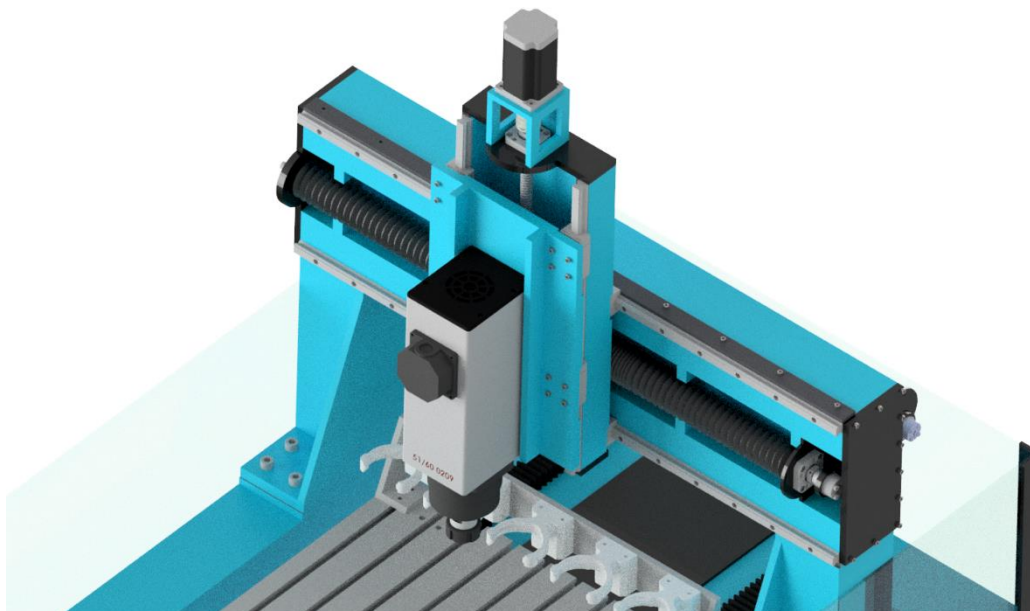


Obr. 38) Sestava saní a vřeteníku

Vřeteník se skládá z ocelové desky o tloušťce 15 mm s přivařenými výztuhy o tloušťce 10 mm, které slouží k zvýšení celkové tuhosti dílce. Uložení vozíku je řešeno stejným principem jako u saní stroje, a to přítlačnou hranou. Montáž jednotlivých vozíku je podrobně popsán v dokumentaci od výrobce.

#### 4.5.4 Ochranné kryty a bezpečnostní prvky

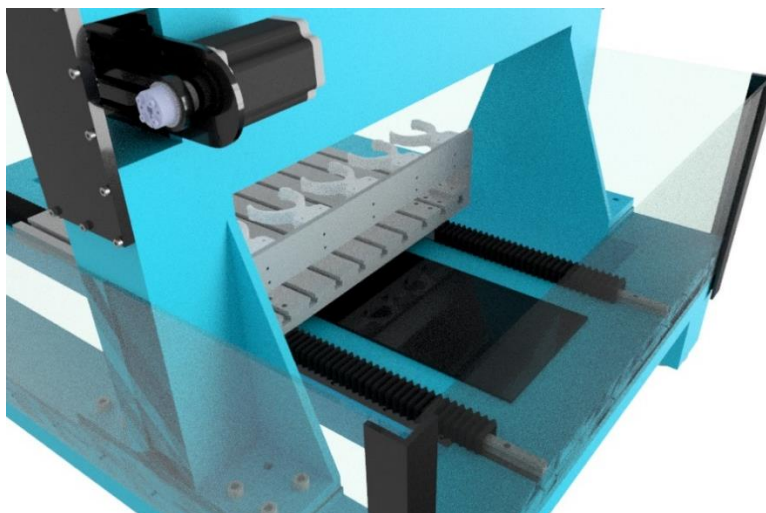
Pro zabezpečení správné funkce kuličkových šroubů po celou dobu životnosti je nutné jeho řádné chránění vůči nečistotám a odpadávajícím třískám. Z toho důvodu budou u os x a y použity krycí měchy od firmy Hennlich obr. 42, který jsou vybraný z katalogu výrobce.



Obr. 39) Krycí kuličkových šroubu krycími měchy

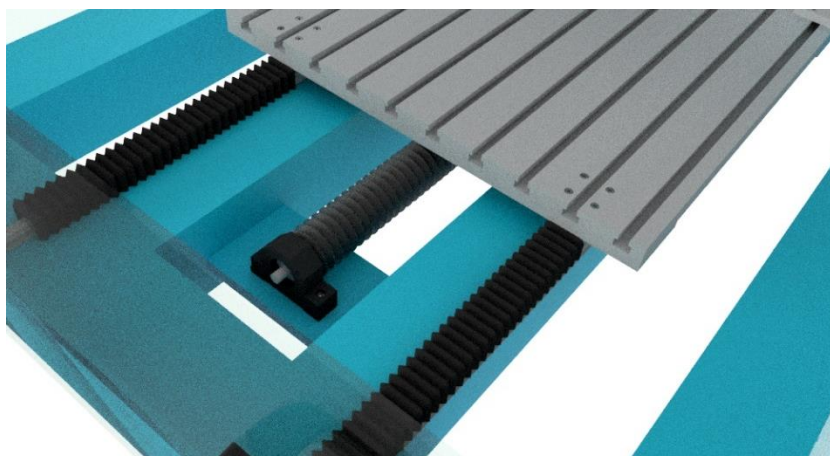
Ochrana servopohonu osy x je vyřešena tenkostěnným plechem o tloušťce 3 mm dle obr.40. Je po nechán průchod pro přirozenou cirkulaci vzduchu.





Obr. 40) Ochrana servopohonu tenkostěnným plechem

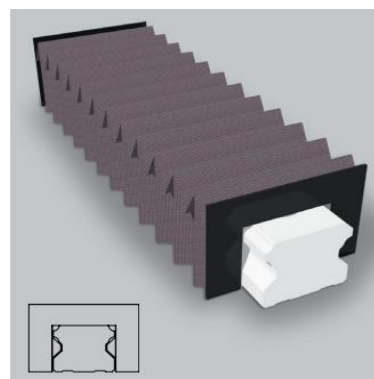
Kolejnice osy X budou opatřeny krycími měchy od stejné společnosti jako kryty kuličkových šroubů, a to od firmy Hennlich, která nabízí přímo řešení na krytí kolejnic lineárního vedení. Na jedné straně budou přidělány přímo k pohyblivému stolu a na druhé straně jsou použity konstrukční desky, přimontované k loži stroje.



Obr. 41) Krytí kolejnic lineárního vedení



Obr. 42) Krycí měch kuličkového šroubu [26]

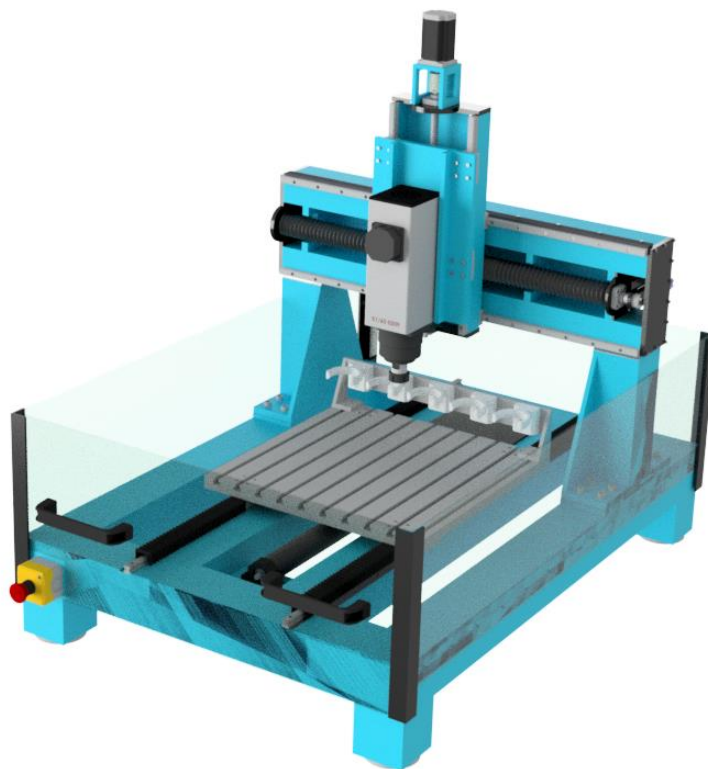


Obr. 43) Krycí měch kolejnic lineárního vedení [26]

## 5 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Návrh malého frézovacího stroje byl řešen v několika krocích. První z nich spočíval ve zvolení nástroje, který bude sloužit pro frézování uhlíkové oceli. Frézka bude převážně sloužit pro frézování oceli, ale návrh byl uzpůsoben i pro frézování měkkých materiálů jako jsou slitiny hliníků, plastů nebo dřeva. To hrálo nejdůležitější roli při výběru vřetene, které bylo voleno s velkým regulačním rozsahem. Z nástroje a ze zvolených řezných podmínek vychází řezné síly vznikající při frézování a vrtání. Vstupující hodnoty řezných podmínek byly upraveny s ohledem na velikost celého stroje. Malý kompaktní stroj se nemůže rovnat velkým konvenčním frézám. Výpočet byl proveden pro použití frézy s poloměrem 8 mm a vrtákem o průměru 6 mm. Při frézování měkkých materiálů mohou být použity nástroje s větším průměrem, přičemž výsledné vznikající síly nepřesáhnou hodnotu řezných sil vznikajících při frézování oceli. Ze zjištěného krouticího momentu bylo vybráno z katalogů výrobců vhodné vřeteno se značnou výkonovou rezervou. Frézka je opatřena zásobníkem nástrojů, a je tedy uzpůsobena pro použití vřetena s možností automatické výměny nástrojů. V dalším kroku následovalo řešení posuvových soustav jednotlivých os s potřebnými výpočty. Z nich vychází volba servopohonů s potřebným výkonem a krouticím momentem. Ke zvolenému servopohonu byl vybrán výkonnější servo-zesilovač z důvodu možnosti dosažení vyšší dynamiky. V posledním kroku byly řešeny samotné jednotlivé konstrukční uzly celé konstrukce stroje.

Detailní návrh konstrukce celého frézovacího stroje je velice rozsáhlý. Z toho důvodu nebyl v zadání práce zahrnut návrh všech jednotlivých částí frézky – jako např. vlastní návrh vřetene, které je vybráno z katalogu výrobců dle výkonových požadavků.



Obr. 44) Finální model CNC frézky





## 6 ZÁVĚR

Cílem práce byl konstrukční návrh kompaktní frézky. Ze začátku práce se provedl rozbor jednotlivých dostupných malých kompaktních frézovacích strojů zejména tuzemských výrobců, ale i významných zahraničních společností. Na základě informací získaných z první části byly vhodně zvoleny parametry konstruované frézky. Následovaly konstrukční výpočty, návrh jednotlivých uzlů stroje, tvorba 3D modelu finálního řešení a výkresová dokumentace.

Druhá kapitola přiblížila problematiku malých obráběcích strojů na obecné úrovni. Především se zaměřuje na nejčastěji používané typy konstrukcí kompaktních frézek, což je pro návrh frézky nejpodstatnější. Následující kapitola se zabývala popisem jednotlivých frézek a soustruhů z konstrukčního a použitelného hlediska s výpisem základních parametrů stroje. Závěr třetí kapitoly je tvořen grafy s porovnáním jednotlivých důležitých rozhodujících parametrů všech zmíněných frézek a soustruhů.

Čtvrtá kapitola popisuje postup návrhu malé frézky. Z počátku návrhu byla ujasněna koncepce návrhu, zvoleny parametry stroje a vhodné maximální řezné podmínky, kterých by se chtělo prakticky dosáhnout. Frézka by měla být schopná obrobit nízkolegovanou ocel frézou o průměru 8 mm a vrtat vrtákem o průměru 6 mm. Následovaly výpočty řezných sil potřebné pro dimenzování rámu stroje a pro volbu vhodného vřetene. U výběru vřetene se zohlednilo použití frézky i pro obrábění dalších kovových i nekovových materiálů. Kapitola také zahrnuje konstrukční výpočty pro návrh posuvových soustav jednotlivých os, na jejichž základě byly voleny použité servopohony. Závěrem čtvrté kapitoly bylo přiblížení řešení vybraných částí stroje a popsání krytovaní náchylných komponent stroje (lineární vedení, kuličkové šrouby).

Vzhledem k rozsáhlosti zvoleného tématu nejsou v zadání práce nutností řešit detailně veškeré části návrhu jako je řešení vlastního vřetene, celkového krytovaní, bezpečnosti stroje, ergonomiky stroje atd.



## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BORSKÝ, Václav. *Obráběcí stroje*. Brno: VUT, 1992. ISBN 80-214-0470-1.
- [2] BORSKÝ, Václav. *Základy stavby obráběcích strojů*. Vyd. 2., přeprac. Brno: VUT, 1991.
- [3] Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 80-214-0361-6.
- [4] *CNC Stroj* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.cncstroj.cz/cz/>
- [5] *CNC-Inaxes* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.cnc-inaxes.cz/>
- [6] *AZK* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.azk.cz/>
- [7] *Optimum* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.optimum-maschinen.de/>
- [8] *Tormach Personal CNC* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <https://www.tormach.com/>
- [9] *HOLZMANN Maschinen GmbH* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.holzmann-maschinen.at/EN/home>
- [10] *Bernardo* [online]. [cit.2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.bernardo.at/home>
- [11] *Seco Tools* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: [https://www.secotools.com/Corp-Web/Downloads/CZ/Jabro%20Solid2/CZ\\_Folder\\_Jabro%20solid%202.pdf](https://www.secotools.com/Corp-Web/Downloads/CZ/Jabro%20Solid2/CZ_Folder_Jabro%20solid%202.pdf)
- [12] *ISO P Oceli* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: [http://www.sandvik.coro-](http://www.sandvik.coro-mant.com/cs-cz/knowledge/materials/workpiece_materials/iso_p_steel/pages/default.aspx)
- [13] *FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- [14] *ŘEZNÉ PODMÍNKY NÁSTROJŮ* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/rezne-podminky-nastroju/>
- [15] *Seco Tools* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: [https://www.secotools.com/Corp-Web/Products/Holemaking/Drilling/final\\_lr\\_eng\\_sd216a.pdf](https://www.secotools.com/Corp-Web/Products/Holemaking/Drilling/final_lr_eng_sd216a.pdf)
- [16] *Teknomotor Electrospindles* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.teknomotor.com/eng/>
- [17] *HSD - Mechatronic Solution* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.hsdusa.com/>
- [18] *ATC Spindles* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: [http://www.blurrycustoms.com/store/MT1073-140-ER25-220V-18-18K-3-0KW-](http://www.blurrycustoms.com/store/MT1073-140-ER25-220V-18-18K-3-0KW-Damen CNC ElectroSpindle)
- [19] *Damen CNC ElectroSpindle* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://damencnc.com/en/milling-motors/teknomotor/electrospindle/1127>
- [20] *HSD - Mechatronic Solution* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: [http://www.hsdusa.com/bo/allegati/Files/1367\\_y6162y0014\\_mt1073-120-er25-380v-dx-18\\_24\\_2\\_.pdf](http://www.hsdusa.com/bo/allegati/Files/1367_y6162y0014_mt1073-120-er25-380v-dx-18_24_2_.pdf)
- [21] *AC frekvenční měniče* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/ac-frekvencni-menice-vfd-el>

- [21] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [22] *Hiwin s.r.o.* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.hiwin.cz/>
- [23] *Chopper 3300 HSK* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.alfredjaeger.de/en/chopper/Chopper-3300-HSK-S5A.html>
- [24] *LK20-C25 – pružná spojka* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.cncshop.cz/lk20-c25-pruzna-spojka-6nm-sverna>
- [25] *TG Drives: Servomotory řady TGN* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: <http://www.tgdrives.cz/servomotory/servomotory-rady-tgn/>
- [26] *HENNLICH* [online]. [cit. 2017-05-19]. Dostupné z: [http://lin-tech.hennlich.cz/fileadmin/user\\_upload/H CZ/Download/Lin-tech/pdf/2013\\_katalog\\_krytovani\\_KRYCI\\_MECHY\\_SRO\\_03\\_PRINT.pdf](http://lin-tech.hennlich.cz/fileadmin/user_upload/H CZ/Download/Lin-tech/pdf/2013_katalog_krytovani_KRYCI_MECHY_SRO_03_PRINT.pdf)
- [27] *ContiTech* [online]. [cit. 2017-05-24]. Dostupné z: <https://www.contitech.de/Solutions/Power-Transmission>

## 8 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

Značka	Jednotka	Popis
$a$	$[m.s^{-2}]$	Lineární zrychlení
$A_D$	$[mm^2]$	Průřez třísky při vrtání
$a_e$	$[mm]$	Šířka záběru
$a_p$	$[mm]$	Hloubka záběru
$b_D$	$[mm]$	Šířka třísky při vrtání
$C_0$	$[N]$	Statická tuhost KŠM
$C_{dyn}$	$[N]$	Dynamická tuhost KŠM
$d_{j\dot{s}}$	$[mm]$	Jmenovitý průměr kuličkového šroubu
$d_k$	$[mm]$	Malý průměr kuličkového šroubu
$D_F$	$[-]$	Průměr frézy
$D_N$	$[mm]$	Otáčkový faktor
$D_{Nmax}$	$[-]$	Maximální otáčkový faktor
$D_V$	$[mm]$	Průměr vrtáku
$f_1$	$[-]$	Součinitel tření ve vodících plochách valivé v.
$f_2$	$[-]$	Ekvivalentní součinitel tření v KŠM
$F_f$	$[N]$	Řezná síla při frézování
$F_v$	$[N]$	Řezná síla při vrtání
$F_g$	$[N]$	Gravitační síla od hmotnosti stolu
$F_{knax}$	$[N]$	Maximální přípustné zatížení KŠ
$f_0$	$[ot.min^{-1}]$	Posuv na otáčku u vrtání
$F_P$	$[N]$	Předepnutí kuličkového šroubu
$f_z$	$[ot.zub^{-1}]$	Posuv na otáčku u frézování
$f_{zv}$	$[ot.zub^{-1}]$	Posuv na otáčku u vrtání
$h_D$	$[mm]$	Tloušťka třísky při vrtání
$h_m$	$[mm]$	Střední tloušťka třísky při frézování
$J_{br}$	$[kg.m^2]$	Moment setrvačnosti brzdy
$J_{k\dot{s}}$	$[kg.m^2]$	Moment setrvačnosti kuličkového šroubu
$J_m$	$[kg.m^2]$	Moment setrvačnosti posuvových hmot
$J_{mot}$	$[kg.m^2]$	Moment setrvačnosti motoru
$J_{rhm}$	$[kg.m^2]$	Celkový moment setrvačnosti redukováný na Hřídel motoru
$J_{spoj}$	$[kg.m^2]$	Moment setrvačnosti spojky

$k_{cl}$	[Mpa]	Měrná řezná síla materiálu
$k_{cf}$	[Mpa]	Měrná řezná síla při frézování
$k_{cv}$	[Mpa]	Měrná řezná síla při vrtání
$k_d$	[-]	Koeficient uložení
$k_k$	[-]	Koeficient v závislosti na uložení pro vzpěr
$l_d$	[-]	Vzdálenost mezi ložisky
$L_h$	[h]	Životnost kuličkového šroubu v hodinách
$m_c$	[-]	Nárůst měrné řezné síly
$M_d$	[N.m]	Minimální potřebný moment dle dynamického Hlediska
$M_G$	[N.m]	Moment zátěže od třecích sil přesouvaných hmot
$M_{GT}$	[N.m]	Moment zátěže pohonu od tíhové složky
$M_{kf}$	[N.m]	Krouticí moment při frézování
$M_{KSM}$	[N.m]	Ztrátový moment pasivních odporů Způsobený odporem v kuličkovém šroubu
$M_{kv}$	[N.m]	Krouticí moment při vrtání
$m_s$	[kg]	Hmotnost stolu
$m_v$	[kg]	Hmotnost vřeteníku
$M_{zdrhm}$	[kg]	Celkový moment zátěže redukováný na hřídel Motoru
$n_f$	[ot.min <sup>-1</sup> ]	Potřebné otáčky pro frézování
$n_k$	[ot.min <sup>-1</sup> ]	Kritické otáčky kuličkového šroubu
$n_v$	[ot.min <sup>-1</sup> ]	Potřebné otáčky pro vrtání
$P_f$	[W]	Potřebné výkon pro frézování
$P_v$	[W]	Potřebné výkon pro vrtání
$s$	[W]	Stoupání kuličkového šroubu
$t$	[W]	Doba rozběhu
$T_v$	[HB]	Tvrдость materiálu dle Brinela
$v_{cf}$	[m.min <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost při frézování
$v_{cv}$	[mm.min <sup>-1</sup> ]	Řezná rychlost při vrtání
$v_f$	[W]	Rychlost posuvu

## Seznam Obrázků:

Obr. 1. Rozdělení konvenčních frézovacích strojů.....	17
Obr. 2. Portálová frézka typu spodní gantry.....	18
Obr. 3. Portálová frézka typu horní gantry.....	19
Obr. 4. Portálová frézka s pohyblivým stolem.....	19
Obr. 5. Popis stolové frézky.....	20
Obr. 6. Univerzální frézka SLV EDU.....	21
Obr. 7. Univerzální frézka SLV 300 .....	22
Obr. 8. CNC frézka EKC-250s .....	23
Obr. 9. HWT E-442 CNC TROLL .....	24
Obr. 10. Vrtačko-frézka BF 46 VARIO .....	25
Obr. 11. PCNC 770 CNC MILL .....	26
Obr. 12. Graf porovnání rozměrů pracovního stolu.....	27
Obr. 13. Graf porovnání výkonu vřetene.....	28
Obr. 14. Graf porovnání velikosti rychloposuvu.....	28
Obr. 15. Monolitní fréza JABRO SOLID JS512 .....	30
Obr. 16. Vřeteno Teknomotor C51/60-A-DB-P 3.3kW.....	32
Obr. 17. Vřeteno HSD MT1073 .....	33
Obr. 18. Výkonově-momentová charakteristika vřetene DB .....	34
Obr. 19. Výkonově-momentová charakteristika vřetene .....	34
Obr. 20. Frekvenční měnič Delta Electronics VFD037EL43A.....	35
Obr. 21. Vřeteno Jäger Chopper 3300 HSK S5A .....	35
Obr. 22. Mometovo-výkonová charakteristika vřetene 3300HSK .....	36
Obr. 23. Dvojitá předepnutá matice DDB .....	37
Obr. 24. Schéma posuvové soustavy osy x.....	37
Obr. 25. Přírubový ložiskový domeček FF-10 .....	41
Obr. 26. Přírubový ložiskový domeček FK-10.....	41

Obr. 27. Výstup ze softwaru Transmission Designer .....	41
Obr. 28. Schéma posuvové soustavy osy Y .....	42
Obr. 29. Sestava vřeteníku a saní .....	45
Obr. 30. Pružná spojka LK20/C25 .....	46
Obr. 31. Schéma pohybové soustavy osy Z .....	46
Obr. 32. Servopohon TGN2,5-0175 .....	48
Obr. 33. Výkonově-momentová charakteristika servopohonu TGN2,5-0175 .....	48
Obr. 34. Servo-zesilovač AKD P00606 .....	49
Obr. 35. Kuličkové vedení firmy Hiwin.....	50
Obr. 36. Lože stroje.....	51
Obr. 37. Portál stroje.....	52
Obr. 38. Sestava saní a vřeteníku.....	52
Obr. 39. Krytí kuličkových šroubu krycími měchy.....	53
Obr. 40. Ochrana servopohonu tenkostěnným plechem .....	53
Obr. 41. Krytí kolejnic lineárního vedení.....	54
Obr. 42. Krycí měch kuličkového šroubu .....	54
Obr. 43. Krycí měch kolejnic lineárního vedení .....	54
Obr. 44. Finální model CNC frézky .....	55



## Seznam tabulek

Tab. 1. Porovnání jednotlivých typů konstrukčních uspořádání.....	20
Tab. 2. Technické údaje stroje SLV EDU .....	22
Tab. 3. Technické údaje stroje SLV 300 .....	23
Tab. 4. Technické údaje frézky EKC-250s.....	24
Tab. 5. Technické údaje stroje HWT E-442 TROLL.....	25
Tab. 6. Technické údaje Vrtačko-frézky BF 46 VARIO.....	26
Tab. 7. Technické údaje frézky PCNC 770 CNC MILL.....	27
Tab. 8. Základní parametry pro návrh stroje.....	29
Tab. 9. Parametry pro výpočet sil při frézování.....	30
Tab. 10. Parametry pro výpočet sil při vrtání .....	31
Tab. 11. Porovnání technický parametrů vřeten .....	33
Tab. 12. Parametry pro návrh posuvové soustavy pro osu X.....	38
Tab. 13. Momenty setrvačnosti součástí osy X.....	40
Tab. 14. Parametry pro návrh posuvové soustavy osy Y.....	42
Tab. 15. Momenty setrvačností součástí osy Y.....	44
Tab. 16. Parametry pro návrh posuvové soustavy pro osu Z.....	45
Tab. 17. Momenty setrvačností součástí osy Z.....	47
Tab. 18. Základní technické parametry servo-zesilovače AKD P00606.....	49

## 9 SEZNAM PŘÍLOH

Výkres sestavení CNC frézky:	CNC-01
Výrobní výkres lože stroje:	CNC-01-01
Výrobní výkres portálu stroje:	CNC-01-02
Výrobní výkres sáně:	CNC-01-03
Výrobní výkres vřeteníku:	CNC-01-04
Kusovník	

